

PROYECTO:

PROGRAMA INTERNACIONAL DE CURSOS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN RIGUROSA DE SECADORES INDUSTRIALES

DOCUMENTO:

GUÍA DEL MÓDULO 0. PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA INTERNACIONAL DE CURSOS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN RIGUROSA DE SECADORES INDUSTRIALES

CLIENTE:

PROFESOR ALEXIS MANUEL FANEITE

Julio 2020

SECAVENCA nace el 31/03/2009, como una empresa de dedicada a generar conocimientos y tecnología aplicada, a los procesos de separación presentes en una biorrefinería, industria de alimentos o plantas agroindustriales, elaborar proyectos industriales y programas de capacitación en estas áreas.

Fue creada por Profesores Universitarios, amparados bajo el Artículo 59 de la Movilidad de los Investigadores hacia el entorno Social y Económico, Capítulo VI, De la Formación del Talento Humano, de la Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación, vigente en Venezuela, para la fecha.

Nuestros orígenes Universitarios, hace que estemos encantados de formarte dentro del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, exclusivo para Universitarios o Profesionales de la Ingeniería. Su contenido, está basado en casi 20 años de investigación en el área; diseñado con un enfoque andragógico, basado en competencias; gestionado bajo el sistema de calidad educativa ISFEDU CW5000:2019 (equivalente a la norma ISO 9001).

Secadores Industriales de Venezuela C.A. (SECAVENCA)



CONTENIDO

SECAVENCA Filantropía

Empleo

Metas futuras

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CUERPO PRINCIPAL

Objetivo de este Módulo

Mostrar los antecedentes, el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos, y la descripción del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, así como las metas futuras planteadas, incluyendo además, el estado del arte, de la Simulación de Secadores Industriales en ambientes de simulación comercial, a los Profesionales o Universitarios de la Ingeniería, que tengan el interés, de ser formados en este interesante tema.

Competencias a desarrollar en el Módulo

El proceso educativo de este Módulo 0, está diseñado para que el participante, desarrolle la **Búsqueda de la excelencia**[1] en el ejercicio diario de su profesión, la **Capacidad crítica**[2] para hacer cuestionamientos del *status quo* del conocimiento en su área, y plantear alternativas, así como la **Visión prospectiva**[3], de su futuro profesional.

También se espera el desarrollo, de la **Sensibilidad medioambiental**[4], que oriente su ejercicio, hacia los bioprocesos y la biotecnología, conducentes a establecer bioeconomías, y más aún, economías circulares, sostenibles e hipocarbónicas, así como la **Sensibilidad interpersonal**[5] hacia las comunidades más necesitadas.

Antecedentes del Programa

En diciembre de 2001, el Profesor Alexis Manuel Faneite, ingresa por concurso de oposición a la ilustre y centenaria Universidad del Zulia (LUZ), como Personal Docente y de Investigación, a dedicación exclusiva, adscrito al Laboratorio de

---

[1] **Búsqueda de la excelencia:** Es el compromiso con la eficiencia y eficacia. Las personas que poseen esta actitud se caracterizan porque: (1) Hacen su trabajo cada día mejor, aún si tienen que asumir más trabajo; (2) No están satisfechos con las cosas como están y buscan mejorarlas; (3) No aceptan la mediocridad (Buol, 2009).

[2] **Capacidad crítica:** Habilidad para la evaluación de datos y líneas de actuación, así como para tomar decisiones lógicas de una manera imparcial y desde un punto de vista racional (Buol, 2009).

[3] **Visión prospectiva:** Capacidad para visualizar el futuro hacia donde se pretende llegar, identificando estrategias, previendo consecuencias y anticipándose a los hechos que pueden generar riesgos en las acciones empresariales que se implementen (Buol, 2009).

[4] **Sensibilidad ambiental:** Capacidad para enfocar la prestación de los servicios, mejorando y respetando las condiciones medioambientales, a través de la búsqueda de la compatibilidad entre las demandas sociales y las líneas estratégicas de la organización (Buol, 2009).

[5] **Sensibilidad interpersonal:** Conocimiento de los otros, del grado de influencia personal que se ejerce sobre ellos. Las actuaciones indican el conocimiento de los sentimientos y necesidades de los demás (Buol, 2009).

Ingeniería Química, de la Escuela de Ingeniería Química (ver Figura 1), de la Facultad de Ingeniería.



Figura 1. Entrada a la Escuela de Ingeniería Química, en el Campus "*Dr. Antonio Borjas Romero*" de la Universidad del Zulia, en Venezuela. Fuente: mapio.net

Dentro de la disertación usada como prueba de conocimientos, se declara el deseo de formar el **Centro de Procesos de Separación y Control de Procesos**, con la finalidad de "*contribuir con la formación más adecuada de nuestros futuros ingenieros y con el sector productivo y petrolero nacional e inclusive internacional*", con lo que queda bien definido, en tan temprana etapa, el alcance Académico esperado por el Profesor Faneite.

Dada la experiencia previa del Profesor Faneite, en la operación de plantas de procesos, se evaluaron cada una de las nueve prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias II, en torno a su vinculación con la industria, y con la teoría, ya que dicho Laboratorio comprende los procesos de separación que se estudian de forma teórica en Operaciones Unitarias II y III, y se imparte como una Unidad Curricular separada de dichas unidades curriculares, en la Escuela de Ingeniería Química de LUZ.

En la Práctica de Secado de Sólidos Granulares en secador rotatorio (ver Figura 2), por ejemplo, se detectaron confusiones teóricas que fueron subsanadas, tal como, exigir el cálculo del tiempo de secado, ya que en el secado en secadores continuos, se habla más bien de tiempo de residencia o de retención, ya que el tiempo que pasa el sólido dentro del secador, no es establecido de forma directa por el operario, sino que es una variable dependiente de parámetros operaciones del secador, como por ejemplo, el patrón relativo de flujo gas/sólido (a contracorriente o cocorriente), la velocidad lineal del gas de secado, la velocidad de rotación y el ángulo de inclinación del secador (variables específicas para el secador rotatorio). Igualmente,

depende de las propiedades físicas de los gránulos de sólido, como dureza, fragilidad, elasticidad, pegajosidad, aglomeración, etc.

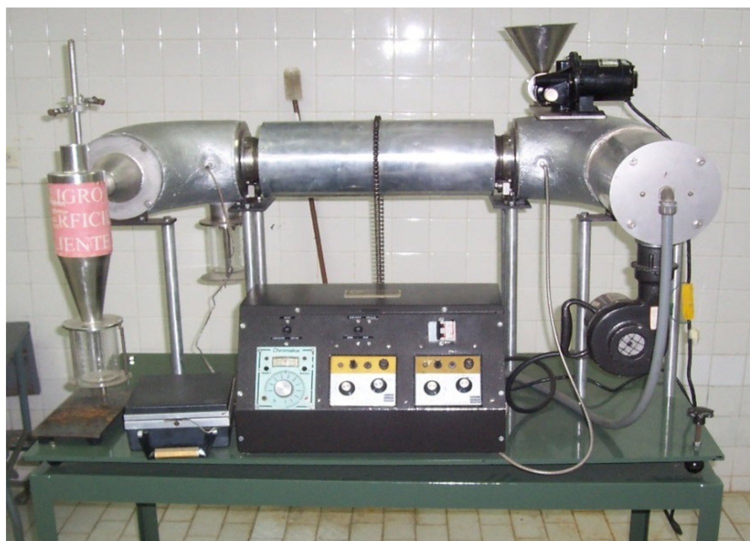


Figura 2. Secador rotatorio piloto, del Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ.

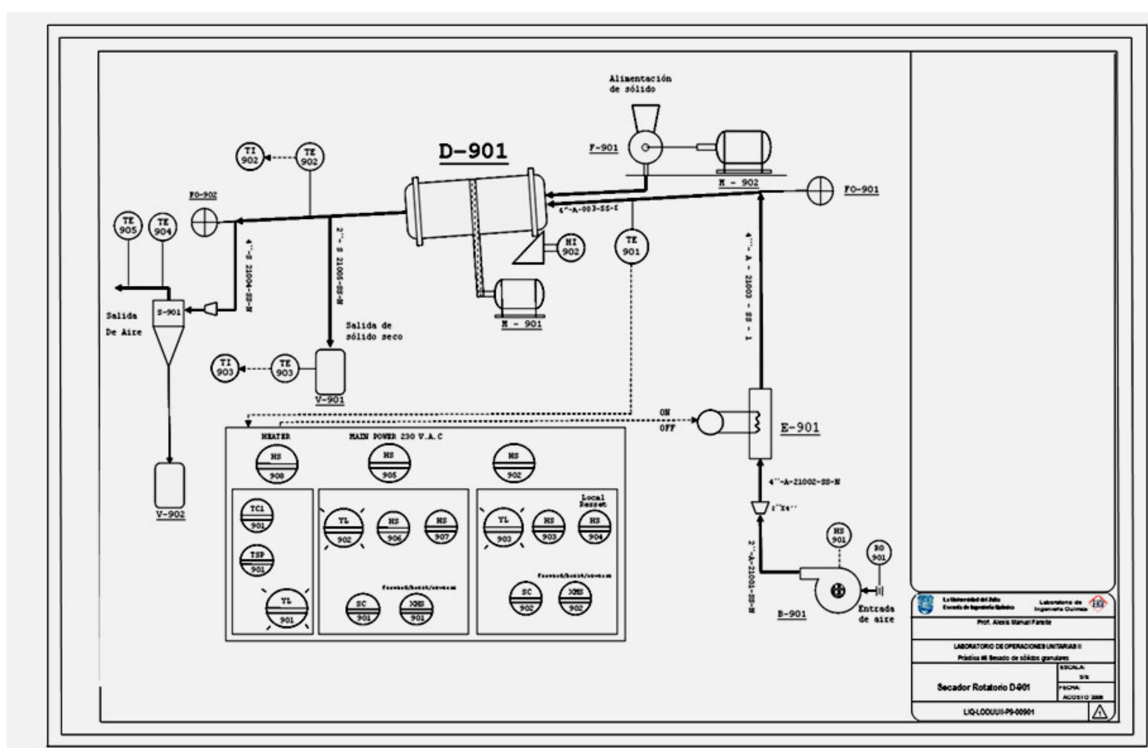


Figura 3. DTI Nº LIQ-LOOUUII-P9-00901, del Secador rotatorio piloto, del Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ (Faneite, 2008).

Se establecieron manuales de procedimientos basados en filosofía de Gerencia de Seguridad en los Procesos (GSP) y los dibujos se establecieron en el formato de

los Diagramas de Tuberías e Instrumentación (DTI), tal como se muestra en la Figura 3.

Así mismo, se cambiaron los objetivos de la Práctica de Secado de Sólidos Granulares, los cuales quedaron en forma resumida, de la siguiente forma: (1) Determinar el balance de masa y energía y la eficacia térmica; (2) comparar el tiempo de retención teórico y experimental; (3) analizar tendencias de las variables principales; (4) utilizar un método preliminar de diseño, para comparar la longitud calculada del secador, con la longitud real y; (5) presentar el perfil interno estimado de temperaturas del gas y el sólido, generado con el método preliminar de diseño (Faneite, 2008). El 90% de estos objetivos, no se exigían, antes de diciembre de 2001, y **todo se mantuvo en calma hasta el 2004**.

En el año 2004, ocurrió un hecho sin precedentes, tal como se aprecia en la Figura 4, que tomó por sorpresa a los habitantes de la cuenca del Lago de Maracaibo. Un manto verde que, en algunas zonas, se perdía de vista, y que cubrió parcialmente, el espejo de agua (Faneite y *et al*., 2013d; Suárez y *et al*., 2013).



Figura 4. Manto verde cubriendo las aguas por debajo del Puente Rafael Urdaneta (Estado Zulia, Venezuela, año 2004).

La aparición de estas inmensas extensiones de masas flotantes, de esta planta acuática, causó gran conmoción a nivel nacional e internacional, y alteró, el normal

desenvolvimiento de las actividades humanas, de esparcimientos, pesqueras y petroleras. Para algunos, fue una visión apocalíptica. En la Fotografía aérea (Figura 5), se aprecia una rivera del Lago de Maracaibo, en el año 2004.



Figura 5. Fotografía de una rivera del Lago de Maracaibo en el 2004.

En las figuras 6 y 7, se aprecia el impacto negativo, que tuvo este manto verde en las actividades petroleras, y en las actividades humanas, de los habitantes de los pueblos de agua (con viviendas de palafitos), del Lago de Maracaibo, respectivamente, dificultando por un lado, el transporte fluvial y por otro, generando, olores putrefactos, por la descomposición de la fracción de plantas muertas dentro del manto, respectivamente (Faneite *et al*., 2013d).

En los años subsiguientes al 2004, continuaron presentándose temporadas de lemna, llegando a ocupar hasta un 14% de la superficie del Lago de Maracaibo (13 000 km^2)[6] (Gundlach *et al*., 2001), dato reportado con periodicidad por el Instituto para la Conservación del Lago de Maracaibo (ICLAM).

Un grupo de investigadores especialistas en el área, fueron invitados a evaluar las causas, consecuencias y posibles soluciones al grave problema que representaba

[6] El Lago de Maracaibo tiene aproximadamente 13 000 km^2 de superficie (la cuenca completa tiene unos 89 000 km^2), más de 13 000 pozos petroleros conectados por más de 32 000 kilómetros de tuberías ubicadas directamente en el lago (el total de tuberías de gas y petróleo en la cuenca se estima que es de 42 693 kilómetros), más de 400 estaciones de bombeo (143 en el Lago) y más de 150 plantas generadoras de electricidad y su capacidad instalada es capaz de producir 3 millones de barriles por día (Gundlach *et al*., 2001).

la lemna en el Lago de Maracaibo, ellos fueron R. A. Leng, PhD, DSc, Profesor *Emeritus* – University of New England; Thomas R. Preston, PhD, DSc y Lylian Rodríguez, MSc., ambos pertenecientes a la University of Tropical Agriculture Foundation.



Figura 6. Área de explotación petrolera en el Lago de Maracaibo (2004).



Figura 7. Comunidad “de agua”, afectada por la lemna (año 2004).

Las conclusiones a la que llegaron este trío de investigadores fue que la planta acuática, responsable del manto verde, era *Lemna obscura*, y su aparición explosiva

es el principal indicativo del inicio de un proceso conocido como eutrofización, el cual termina con la transformación del Lago de Maracaibo en un pantano (Leng *et al*., 2004).

La hipótesis principal para su aparición, es que desde hace mucho tiempo, se vienen vertiendo al Lago de Maracaibo ingentes cantidades de desechos industriales y urbanos, debido al crecimiento de las poblaciones que rodean sus riveras, y al aumento de las actividades industriales y agropecuarias de las regiones zuliana y andina de Venezuela, y las poblaciones fronterizas de Colombia, todas pertenecientes a su cuenca, teniendo el Lago, restricciones para su autopurificación, debido a que su cono hipolimnético, contiene agua salada, que no se mezcla con agua dulce. Teniendo entonces una acumulación considerable de nutrientes no eliminados en el cono, se produjeron lluvias torrenciales que alimentaron el caudal de su río tributario principal, el Catatumbo, el cual entra de forma casi tangencial al espejo de agua, produciendo una turbulencia generalizada que diseminó dichos nutrientes, justo cuando aves migratorias traían semillas de lemna adheridas a su cuerpo. Esta agua salada es agua de mar que entra en forma de cuña, por el fondo del canal de navegación con salida al mar del Lago, dragado para la navegación de buques petroleros, de alimentos y petroquímicos.

Por otro lado, se encontró en muestras de lemna verde, una fracción de proteína cruda, en base seca de alrededor del 28% (Leng *et al*., 2004), siendo probada, para alimentar aves, cerdos y rumiantes, tal como se muestra en la Figura 8.

Dado los hallazgos, de Leng *et al*. (2004), el Profesor Alexis Ferrer de la Facultad Experimental de Ciencia de la Universidad del Zulia, pensó en someter la lemna (ver Figura 9) a un proceso de biorrefinación para obtener un concentrado proteico que sustituyera la torta de soya, e industrializarla, pero se topó con un gran problema, **la lemna tiene 94% de humedad, en base húmeda (bh)**.



Figura 8. Animales de granja alimentados con lemna (año 2004), en las cercanías del Lago de Maracaibo.



Figura 9. *Lemna obscura*.

En ese momento, la Biorrefinería del Dr. Alexis Ferrer, a escala semicomercial, ya estaba en fase de construcción, basada en la tecnología de presurización y despresurización amoniacal (PDA).

El Profesor Alexis Ferrer, acudió a finales del 2004 al Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, buscando soporte en Ingeniería química, para resolver el problema de la logística de suministro de la lemna para su biorrefinería semicomercial, ya que el transporte de la lemna, sería básicamente, transporte de agua, siendo el Ing. Alexis Faneite, quien se sumó a la causa de forma inmediata, empezando ese mismo año, los estudios de secado de lemna en secador rotatorio.

Se utilizó *Lemna obscura* recogida en la Punta Don Alonso, Barranquitas, Estado Zulia. Se generó la primera curva de secado, en el Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ (Figura 10a). Se llevaron a cabo 20 pruebas en el Secador Rotatorio Piloto del Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, a diferentes velocidades lineales de gas y velocidades de rotación diferentes, dejando fija la inclinación y la temperatura de entrada del aire de secado, se les midió consistencia a las pruebas, a través de la comparación del agua transferida por el sólido, con respecto al agua transferida al gas, ya que se contaba con las 6 variables (humedades de entrada y salida y flujos del aire y del sólido). Usando el coeficiente de variación como prueba estadística de consistencia, se encontró un valor máximo de 1,19%, por lo que se consideran datos satisfactoriamente consistentes. Se validó un método preliminar de diseño (ver perfil estimado, de una de las 20 pruebas experimentales, en la Figura 10b), que se encontró susceptible a la retención volumétrica de lemna en el interior, por lo que se generaron correlaciones de corrección. Se diseñó un secador para *Lemna obscura* a escala comercial, incluyendo los detalles mecánicos, a través de una tesis interdisciplinaria de Ingeniería Química y Mecánica, inédita en la Universidad del Zulia (Faneite *et al*., 2006; Faneite *et al*., 2007a,b; Faneite *et al*., 2010; Faneite *et al*., 2013c).

En el 2006, se publica el primer trabajo de investigación, titulado “Ingeniería Básica para el diseño de un secador rotatorio continuo para deshidratar la *Lemna obscura* presente en el Lago de Maracaibo” en el Volumen 14 de la Revista “Ciencia”, Nº especial 2, con motivo del I Congreso Internacional de la Cuenca del Lago de Maracaibo (Faneite *et al*., 2006).

El interés en general por el secado, hace que en el año 2008, se investiguen las características de secado y modelado matemático para el bagazo de caña de azúcar tratado y no tratado en una planta piloto PDA, trabajo especial de grado, de la Universidad Rafael Urdaneta (URU), dirigido entre el Profesor Alexis Ferrer y el Profesor Alexis Faneite (Faneite *et al*., 2013b). Las curvas de secado del bagazo, con el mejor modelo de secado en capa fina, se muestra en la Figura 10c.

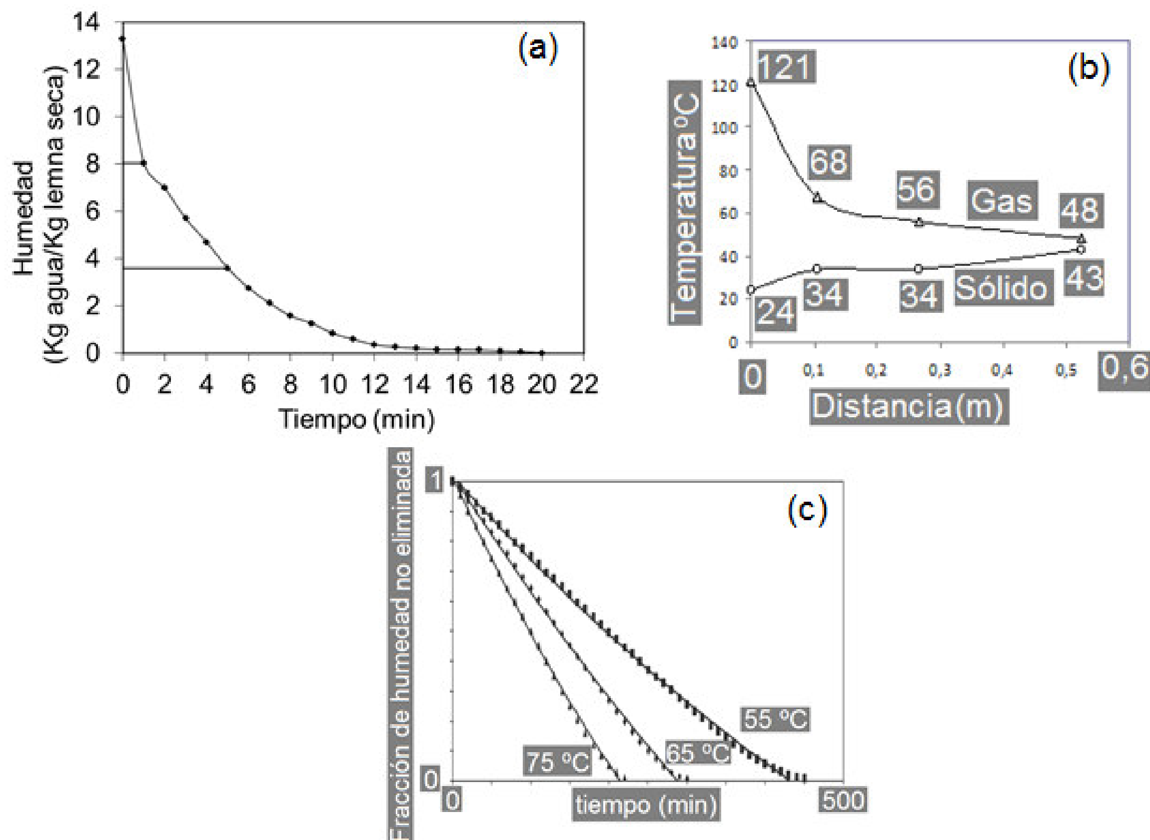


Figura 10. (a) Curva de secado de la lemna a 105 ºC (Faneite *et al*., 2013c), (b) perfiles de temperatura de una prueba en secador rotatorio (Faneite *et al*., 2006; Faneite *et al*., 2007a,b; Faneite *et al*., 2010), (c) Curvas de secado del bagazo de caña, modelo logarítmico (Faneite *et al*., 2013b).

En la primera semana de Junio de 2008, se asiste a la "Jornada Iberoamericana sobre Fortalecimiento y Sostenibilidad del Sector Industrial de la Caña de Azúcar“, en la Antigua, Guatemala, conociendo a la Ing. Dora Paz, líder de un grupo de investigación argentino, que publicó en una revista científica local, en los años noventa, el diseño de secadores de transporte pneumático de bagazo de caña, con una metodología intermedia entre preliminar y rigurosa (Aralde *et al*., 1992 y 1993). Esto información solo estaba en físico y la Ing. Dora, suministró gentilmente estos trabajos, los cuales sirvieron como estudios seminales de las simulaciones rigurosas posteriores, de secadores de transporte pneumático. En la Figura 11, se presenta, la foto oficial del evento.

Secadores Industriales de Venezuela C.A. (SECAVENCA), nace el 31/03/2009, como una empresa de Investigación, Desarrollo, Innovación y Formación, dedicada a generar conocimientos y tecnología aplicada, a los procesos de separación

presentes en una biorrefinería, industria de alimentos o plantas agroindustriales, elaborar proyectos industriales y programas de capacitación en estas áreas.



Figura 11. Asistentes a la Jornada Iberoamericana sobre Fortalecimiento y Sostenibilidad del Sector Industrial de la Caña de Azúcar. La Antigua, Guatemala, del 02 al 06/06/2008.

Fue creada por Profesores Universitarios amparados bajo el Artículo 59 de la Movilidad de los Investigadores hacia el entorno Social y Económico, Capítulo VI, DE LA FORMACIÓN DEL TALENTO HUMANO, de la LEY ORGÁNICA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN, vigente para la fecha (31/03/2009), en donde se establecía la posibilidad de que los Investigadores de Instituciones Públicas, conformaran empresas con base en la tecnología, desarrollada en sus actividades de investigación. Este artículo, fue suprimido en la siguiente reforma a esta Ley. En la Figura 12, se muestra el logotipo de SECAVENCA y su ícono.

El Logotipo de SECAVENCA, denota el interés principal de elaborar proyectos, construir, arrancar y hacer pruebas de desempeño de plantas de procesos y/o equipos industriales; en especial, sistemas industriales de secado, deshidratación, transporte y almacenaje de todo tipo de materiales; procesamiento de alimentos y refinación de biomateriales, teniendo como base, nuestra propia tecnología, obtenida de procesos de investigación, desarrollo e innovación llevados a cabo bajo los más estrictos protocolos científicos.

El ícono o isótopo de SECAVENCA (hojas en espiral), denota la orientación de su negocio, hacia la agroindustria, alimentos y bioprocesos, siempre en armonía con el medio ambiente, apoyando todos los esfuerzos que tiendan hacia la bioeconomía, la economía sostenible, circular e hipocarbónica.



Figura 12. Logotipo (*arriba*) e Ícono (*abajo*) de SECAVENCA.

Del 11 de mayo al 16 de julio de 2009, el Profesor Alexis Faneite, fue Becado por la Fundación Carolina de España, para llevar a cabo una estancia científico cultural en la Universidad Pública de Navarra, en Pamplona, España, en donde se estudió el secado en capa fina, en un equipo para la medición experimental de curvas cinéticas de secado, para hojas de papa y calabacín, frescas y presecadas en invernadero, a diferentes temperaturas y velocidades lineales de aire de secado, sí como, la asistencia a los sanfermines 2009. En la Figura 13, arriba, se observa el momento de introducir la muestra en dicho equipo, y debajo, el momento de la medición de la pérdida de peso, de la muestra en función del tiempo.

Soluciones Tecnológicas en Secado del Zulia, compañía anónima, (SECAZULCA), nace el 11/11/2009, como una empresa emergente (conocidas internacionalmente, como “startups”), dedicada al acondicionamiento itinerante de la *L. obscura* del Lago de Maracaibo para su transporte hacia la Biorrefinería del Prof. Ferrer. En la Figura 14, se muestra su logotipo.





Figura 13. Introducción de la muestra a secar (*arriba*), y medición de la pérdida de peso de la muestra, en función del tiempo (*abajo*).

Esta startup, debía tener un equipo de secado portátil para ir a puntos de recolección con lemna de calidad[7], secarla y transportarla a la biorrefinería antes mencionada. Fue financiada inicialmente por una Institución de Capital de Riesgo de Venezuela,

---

[7] Lemna verde y joven, sin mal olor y con alto contenido en proteína cruda.

con lo que se esperaba que fuese una empresa mixta, entre el estado venezolano y el sector privado. En su fase de instalación, generó 10 empleos directos y 200 indirectos y, por diversas razones, la empresa no pudo iniciar operaciones comerciales, ni tampoco la Biorrefinería antes mencionada.

Fue la primera empresa consumidora de la tecnología de SECAVENCA, para su aplicación comercial. En el Proyecto de SECAVENCA para SECAZULCA, se generaron 6 empleos directos y 35 indirectos. En la Figura 15, se aprecian varios isométricos y dibujos de detalle del proyecto. Las bases de diseño para la Ingeniería básica, fueron suministradas por el Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, a cambio de lo cual, SECAVENCA hizo importantes donaciones de equipos y reactivos. Este hecho, contribuyó significativamente al establecimiento de lazos entre la Universidad y el Sector productivo emergente, en el Zulia.



Figura 14. Logotipo de SECAZULCA.

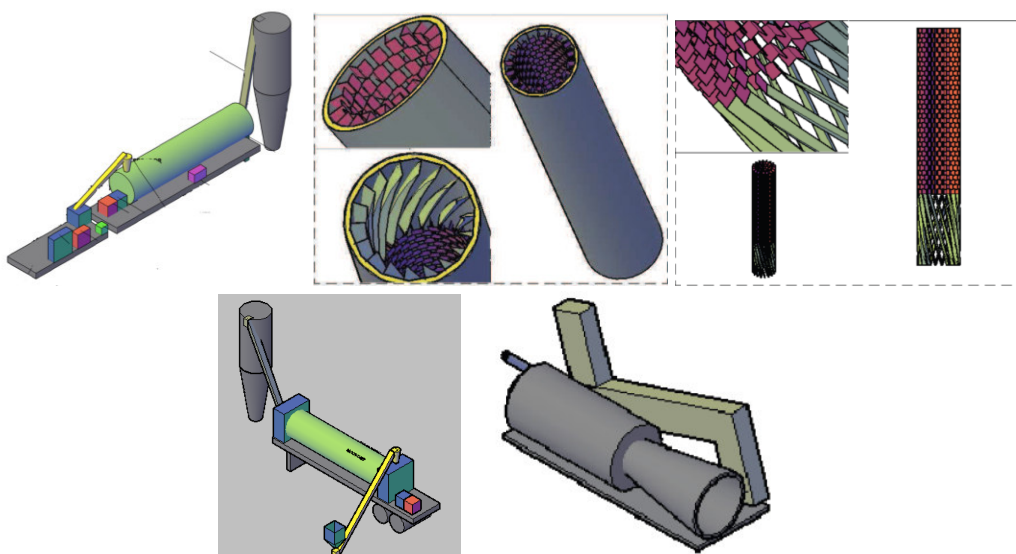


Figura 15. Algunos dibujos isométricos y de detalle, del sistema de secado portátil de SECAZULCA, elaborados por SECAVENCA.

Entre 2009 y 2014, se inicia el Proyecto "Biocombustibles sostenibles, a partir de residuos agroindustriales, en los países del norte de los andes" (SUBA, por sus siglas en inglés), para abordar los múltiples desafíos relacionados con la sostenibilidad de la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica, en particular la optimización de la logística del suministro, la optimización y la selección de métodos adecuados de pretratamiento de biomasa, y una mejor integración de los procesos de bioconversión.

Las instituciones unidas en consorcio para la ejecución de este proyecto fueron, por parte de Suiza, la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL); por Venezuela, el Instituto Zuliano de Investigaciones tecnológicas (INZIT) y LUZ; por Colombia, la Universidad Autónoma de Occidente (UAO), la Universidad del Valle (UNIVALLE) y el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA). Los logos de estas instituciones, en este mismo orden de izquierda a derecha se muestran en la Figura 16.



Figura 16. Logotipos de las Instituciones participantes en el SUBA.

Durante este proyecto, se llevan a cabo estudios de cinética de secado en capa fina con materiales como, la fruta del *Prosopis juliflora* (cují o algarrobo) en conjunto con la Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (Coro, Venezuela); hojas de *Manohit esculenta* Crantz (yuca o mandioca); *Lemna obscura* fresca, presecada al sol y tratada con pretratamiento PDA; hojas de maíz de tipo híbrido amarillo para cachapas (de 55 días de edad), hojas de caña (variedad Puerto Rico 61632), y hoja y nervadura central de la hoja de plátano (variedad Harton); conchas de plátano verde, variedad Harton; Conchas de cangrejo azul (*Callinectes sapidus*) y de camarón marino (*Litopenaeus schmitti*); pastos King grass, Guinea y Bermuda; y raíz de yuca o mandioca (*Manohit esculenta* Crantz) (Morán *et al*., 2017; Medrano *et al*., 2013; Faneite *et al*., 2013d; Suárez *et al*., 2013; Faneite, 2010; Faneite *et al*., 2016; Faneite *et al*., 2013a; Morán, 2011; Faneite *et al*., 2020, respectivamente).

Todo esto condujo a crear una nueva corriente de pensamiento, basada en el entendimiento de los fenómenos que ocurren en el secado de materiales, cuya base son polisacáridos (almidón, celulosa, quitina, pectina), que a la fecha, se sigue estudiando.

En el 2011, se inició el Proyecto “Planta de Producción de Quitosano”, por parte de SECAVENCA, para uno de los grupos económicos, más importantes del Zulia, el cual duró alrededor de 3 años y donde se desarrolló un tecnología para recuperación de la solución de hidróxido de sodio al 50% gastada en la etapa de desacetilación de la quitina. Este proceso está en proceso de registro de la patente. Se simuló un secador de cinta transportadora, cuyas bases de diseño fueron generadas por el Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, a cambio de donaciones en equipos y reactivos.

En Mayo de 2011, el Profesor Alexis Faneite se hace miembro de la Sociedad Iberoamericana para el Desarrollo de las Biorrefinerías (SIADEB), con sede en Lisboa, Portugal. Sociedad de reciente fundación, para la fecha, siendo el Dr. Alexis Ferrer, socio fundador (ver logotipo de la SEIADEB, en la figura 17).



Figura 17. Logotipos de la SIADEB.

También entre 2009 y 2014, se asiste a los dos eventos considerados, los de mayor impacto en el mundo, en el tema de biocombustibles y biorrefinación, el 33rd Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals. Seattle (Estados Unidos de Norteamérica) del 02 al 05 de mayo del 2011, y al XIX International Symposium on Alcohol Fuel. Verona (Italia), del 10 al 14 de Octubre del 2011 (Faneite *et al*., 2012).

Las investigaciones en el área de secado, antes mencionadas, se llevaron en paralelo, con las responsabilidades contractuales asumidas para con el Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, por parte del Profesor Alexis Faneite, que consistían en recuperar una línea de investigación en medición de datos termodinámicos vapor-líquido isotérmicos (la celda de medición experimental, se muestra en la Figura 18), a baja presión, abandonada. Se generaron dos artículos en revistas Q1, “Isothermal Vapor–Liquid Equilibrium Data of Propan-1-ol + 2,2,4-Trimethylpentane and Butan-1-ol + 2,2,4-Trimethylpentane at 318.15 K”, publicado en la Journal of Chemical & Engineering Data, en el 2011, y “Excess Molar Volumes, Excess Molar

Enthalpies and Refractive Index Deviations for Binary Mixtures of Propan-1-ol, Butan-1-ol and Pentan-1-ol with 2,2,4-Trimethylpentane at 25 ºC", publicado en la Fluid Phase Equilibria, en el 2012 (Garcés *et al*., 2011; Faneite *et al*., 2012, respectivamente).

Se llevaron a cabo pruebas más profundas, en torno a los fenómenos que le ocurren al material, al momento de secarse, a través de, la humedad de saturación de materiales secos; espectroscopia infrarroja con transformada de Laplace (FTIR), con un Espectrofotómetro infrarrojo (Perkin-Elmer, Modelo GX, USA); y difracción de rayos X, con un Difractómetro Bruker (Karlsruhe - Alemania) modelo D8 con radiación de Cobre. Una fotografía de la prueba de humedad de saturación y de los equipos mencionados, se muestra también en la Figura 18.

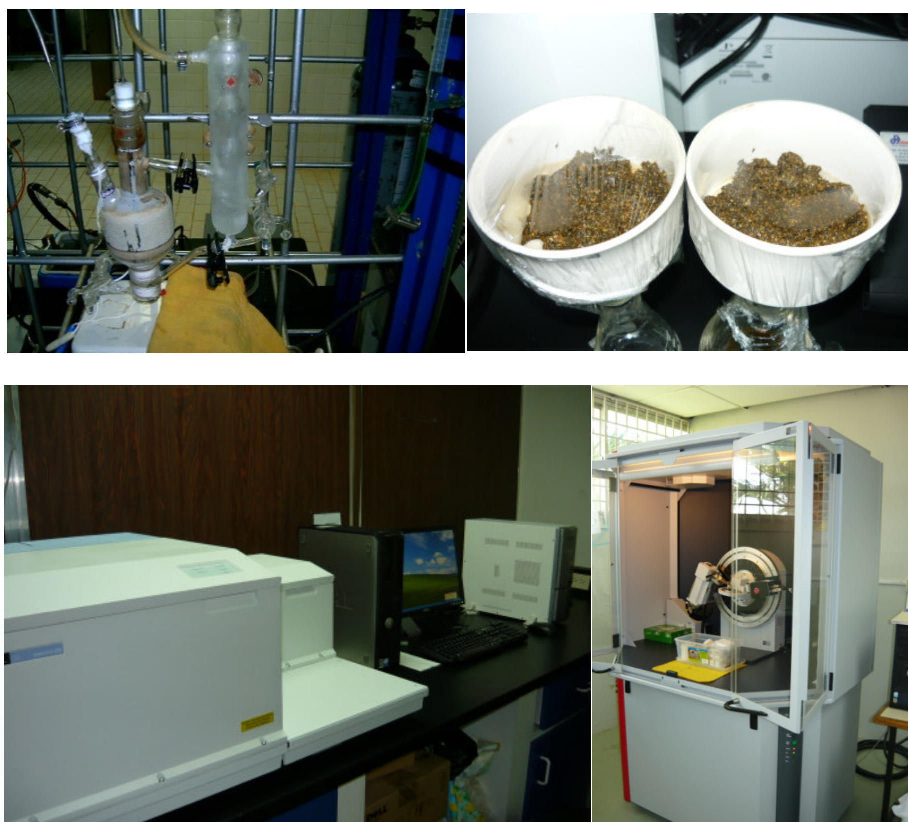


Figura 18. Celda de equilibrio (*arriba/izquierda*), medición de humedad de saturación (*arriba/derecha*), espectrofotómetro infrarrojo (*abajo/izquierda*) y difractómetro de Rayos X (*abajo/derecha*).

Aprovechando la experiencia en el área de termodinámica para la Ingeniería Química, se cuestionan paradigmas en el área de secado, que se consideran contradictorios: 1. Una propiedad termodinámica, conocida como Energía de activación, que define un proceso cinético y para lo cual no se tiene una explicación

clara, ni se compara con otras propiedades termodinámicas; 2. Una propiedad termodinámica conocida como humedad de equilibrio que se pone como límite del proceso cinético de secado, sin tomar en cuenta que existe un periodo de transición entre ambos fenómenos; 3. Desconexión del modelado del proceso de secado, basado en ecuaciones empíricas de secado encapa fina, con respecto a los modelos requeridos por los simuladores (se generaban modelos con parámetros para cada temperatura) (Faneite *et al*., 2016 y 2020).

Como parte de la Labor Social de SECAVENCA, el día martes 07 de junio de 2011, se llevó a cabo una actividad de capacitación, para los padres de familia, de la comunidad del Sector el Ahorcado (coordenadas geográficas: Latitud: 10°1'49,75" y Longitud: 71°13'58,09", Municipio Lagunillas, del Estado Zulia, en Venezuela), en la recolección, acondicionamiento y uso de la lemna del Lago de Maracaibo para sus rebaños de subsidencia. Así mismo se les canceló el día de trabajo, se les suministró implementos para llevar a cabo esta labor, y se hizo una comida comunitaria para sus familias. En la Figura 19, se aprecian, algunas de las distintas actividades, llevadas a cabo en ese día.



Figura 19. Capacitación de padres de familia del Sector el Ahorcado, Municipio Lagunillas, Estado Zulia, Venezuela, en la utilización de lemna para sus animales de granja.

En el año 2014, el Profesor Alexis Faneite, es ubicado como Profesor Titular, en la Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín (URBE), en Maracaibo, Venezuela, y contratado para dictar Seminario de Investigación I, II, III y IV, en la Maestría de Ingeniería de Control y Automatización de Procesos, para una sección de estudiantes connacionales venezolanos y otra sección de estudiantes internacionales. En esta etapa, que comprenden dos años (entre 2014 y 2016), el Profesor Faneite es formado, en la educación virtual y a distancia, instrumentando esta capacitación en el dictado de la asignatura en la sección de estudiantes internacionales, para minimizar sus traslados a territorio venezolano. En la Figura 20, se aprecia parte de la facha principal de URBE.



Figura 20. Parte de la fachada principal, de URBE.

El 05 de noviembre de 2014, el consejo de Facultad de Ingeniería de LUZ, aprueba La línea de Investigación "Desarrollo de Biorrefinerías" adscrita al Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, y dirigida por el Profesor Alexis Faneite.

Sus Objetivos quedaron establecidos de la siguiente forma:

1. Describir las características, ubicación geográfica, producción y variabilidad, de los subproductos agrícolas y agroindustriales de mayor disponibilidad en Venezuela, incluyendo, las condiciones socio-económicas de las comunidades rurales aledañas, conjuntamente con las condiciones climatológicas, y la accesibilidad a los servicios públicos e industriales.

2. Construir módulos de simulación para las distintas operaciones unitarias de separación, reacción y cambio físico del proceso de biorrefinación de materiales lignocelulósicos, incluyendo aquellas que estén involucradas en el acondicionamiento y logística de suministro de materia prima.

3. Analizar en términos técnico-económicos, los esquemas más probables de biorrefinación de las materias primas disponibles, para cada caso, en el tiempo de vida útil de la biorefinería, en función de las necesidades de bienes y servicios, y de atención socio-económico de las comunidades rurales aledañas.

4. Analizar estrategias de aumento de la eficiencia energética, autosostenibilidad y de minimización el impacto ambiental de los esquemas más probables de biorrefinación.

5. Determinar una metodología para el diseño de biorrefinerías de materiales lignocelulósicos, técnico-económicamente factibles, ambientalmente sostenibles y socialmente viables, tomando en cuenta la variabilidad y el acondicionamiento de la materia prima, en el tiempo de vida útil de la biorefinería.

En el 2015, se presenta ante el Gobierno Regional del Estado Zulia, un macroproyecto para sustituir importaciones de componentes de alimentos balanceados, usando insumos locales.

El objetivo principal de este proyecto era construir la primera planta agroindustrial de biorrefinación en Venezuela, de producción de alimento para animales de granja, a escala demostración y de cultivo dedicado de lemna, yuca y moringa, como materias primas locales únicas requeridas, evitando la necesidad de acudir a la importación de maíz y soja.

Esta biorrefinería estaría integrada a una Red de Investigación conjuntamente con Laboratorios de Instituciones Públicas, desde la cual, se desarrollarían y validarían Paquetes Tecnológicos, que servirían de base para la Instalación de Sistemas Agroindustriales de producción de carne (Cultivos de la materia prima autóctona – Procesamiento en planta de biorrefinación a escala industrial – Manejo de la granja pecuaria hasta beneficio), lo cual implicaba: (1) el manejo de los cultivos que sirvan de materia prima para la confección del alimento de animales; (2) prototipos robótico (drones) y mecánicos para la siembra, vigilancia, cosecha y acondicionamiento post-cosecha; (3) Proceso biotecnológico de confección del alimento; (4) Manejo estabulado de los rebaños para el mayor aprovechamiento de este nuevo alimento y beneficio.

Dentro de la vida útil de esta Biorrefinería (25 años) se estudiarían y generarían Paquetes Tecnológicos año a año para animales de granja específicos (distintas razas de cerdos, bovinos, bufalinos, caprinos, ovinos, pollos, gallinas, patos, codornices, pavos, conejos, etc.) y regiones específicas del país, pudiendo evaluar a su vez, variantes en la materia prima, para aprovechar ciertos recursos locales de interés. Estos Paquetes Tecnológicos podrían ser luego aplicados para aumentar la producción de carne en el país, mediante financiamiento público, privado o mixto, nacional o internacional. Este proyecto se planteó, con la particularidad de que, a pesar de que es de investigación, aumentaría la producción de carne en el Zulia y se autofinanciaría para mantener la operatividad por el tiempo de vida útil de los equipos (25 años), luego de concluido.

Se presentó en el formato, de un estudio de prefactibilidad técnico-económica, y fue expuesto en eventos regionales (Faneite *et al.*, 2016a). Debido a diversas razones,

no se cristalizó más allá del apoyo público de la Gobernación del Estado Zulia. En la Figura 21, se muestra el esquema general de la propuesta.

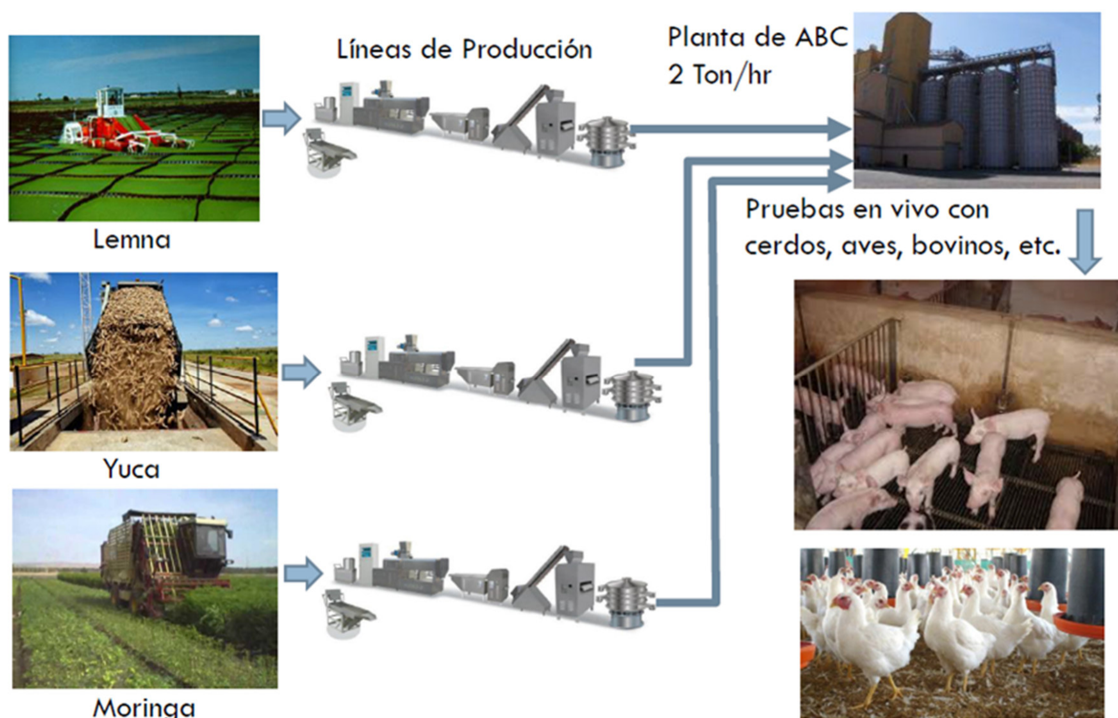


Figura 21. Esquema de la propuesta tecnológica del sistema integrado de producción de carne, huevos y leche, con recursos vegetales locales y de cultivo dedicado (Faneite *et al*., 2016a).

También en el 2015, fue entregado el Proyecto "Producción semi-industrial de alimentos a base de *Moringa oleífera*" a la Nueva Comunidad Socialista "Comunidades sin barreras" y Cooperativa Moringa Venezuela responsabilidad limitada, como parte de las actividades de Proyecto Comunitario, de la Escuela de Ingeniería Química de LUZ, lo cual, fue reseñado en el Semanario de la Universidad del Zulia, LUZPeriódico, Año 13, Nº 647, del 29 de noviembre al 5 de diciembre de 2015, por medios radiales de la misma Universidad del Zulia, y por medios televisivos nacionales (Programa a voz alzada – Vive tv, https://youtu.be/e3uZ6gXG-VY).

El objetivo de este Proyecto fue, elaborar una ingeniería básica para el establecimiento de una planta comercial, de procesamiento de cultivo dedicado de follaje de moringa, para producción de hojas de moringa frescas y deshidratadas enteras y pulverizadas para consumo humano, y ramas de moringa molidas para consumo animal, soportada por los avances científicos y tecnológicos de la Línea de Investigación "Desarrollo de Biorrefinerías" del Laboratorio de Ingeniería Química

de la Universidad del Zulia, y de los conocimientos de la Materia “Diseño de Plantas”, de los estudiantes involucrados en este grupo de Servicio Comunitario. Así mismo, se hicieron pruebas de degustación para distintos productos elaborados con hojas de moringa en sus distintas presentaciones (frescas, deshidratadas y pulverizadas), con la intención de validar la aceptación del público.

Las secciones técnicas de la ingeniería básica entregada, fueron las siguientes: (1) Estudio de Mercado, (2) tamaño y localización, (3) Estudio Técnico y Estudio económico y financiero. Este documento sirvió como soporte en las solicitudes de financiamiento de dicha comunidad, ante entes gubernamentales.

En la Figura 22, se aprecia la entrega de reconocimientos por parte de la Nueva Comunidad Socialista “Comunidades sin barreras”, al Profesor Faneite, e igualmente, fueron reconocidos, el resto de los estudiantes, integrantes de este Proyecto Comunitario.



Figura 22. Entrega de reconocimientos por parte de la Nueva Comunidad Socialista “Comunidades sin barreras”, a los integrantes del Proyecto Comunitario.

En el 2016, se publicó el libro “Analytical Techniques and Methods for Biomass” de la prestigiosa editorial Springer, en donde el Profesor Alexis Faneite, queda como coautor del capítulo III, titulado “Analyses of Biomass Fibers by XRD, FT-IR, and NIR” (Ferrer *et al*., 2016), proponiendo un índice de cristalinidad específico para materiales lignocelulósicos, bautizado como índice de Faneite, ya que hasta ese momento, se usaba un índice de cristalinidad de Segal, desarrollado para materiales cristalinos, tal como los minerales. En la Figura 23, se aprecia la portada del Libro.

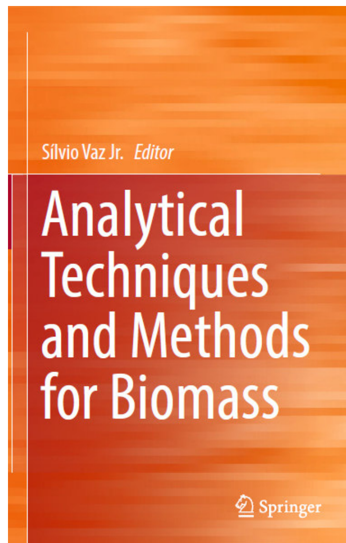


Figura 23. Portada del libro “Analytical Techniques and Methods for Biomass” (2016).

En el trabajo de Singh *et al*. (2021), se prueba la ecuación de Faneite para índice de cristalinidad de materiales lignocelulósicos por primera vez para un material diferente a los de la Línea de Investigación “Desarrollo de Biorrefinerías” del Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, específicamente, para el jacinto de agua, generando resultados excelentes, por encima de los índices tradicionales, orientados más al área de la cristalografía.

En el 2016, se arranca la tesis titulada “Diseño de una biorefinería para la producción de jarabe glucosado de bagazo de caña integrada a una central azucarera”, de la Maestría de Ciencia y Tecnología de Alimentos de LUZ, donde se simula de forma rigurosa, un tren de secadores de transporte pneumático de bagazo de caña, para contar con materia prima durante todo el año (Montiel, 2017).

En el 2017, se lleva a cabo un proyecto, para un importante grupo económico del Zulia, en el formato de Ingeniería Básica, para una planta de producción de alimento base para bovinos, aprovechando, todas las partes de la planta de yuca o mandioca (follaje y raíces). Se simularon de forma rigurosa secadores rotatorios y de cinta transportadora. En la Figura 24, se aprecia un diagrama de procesos, de una de las líneas de producción.

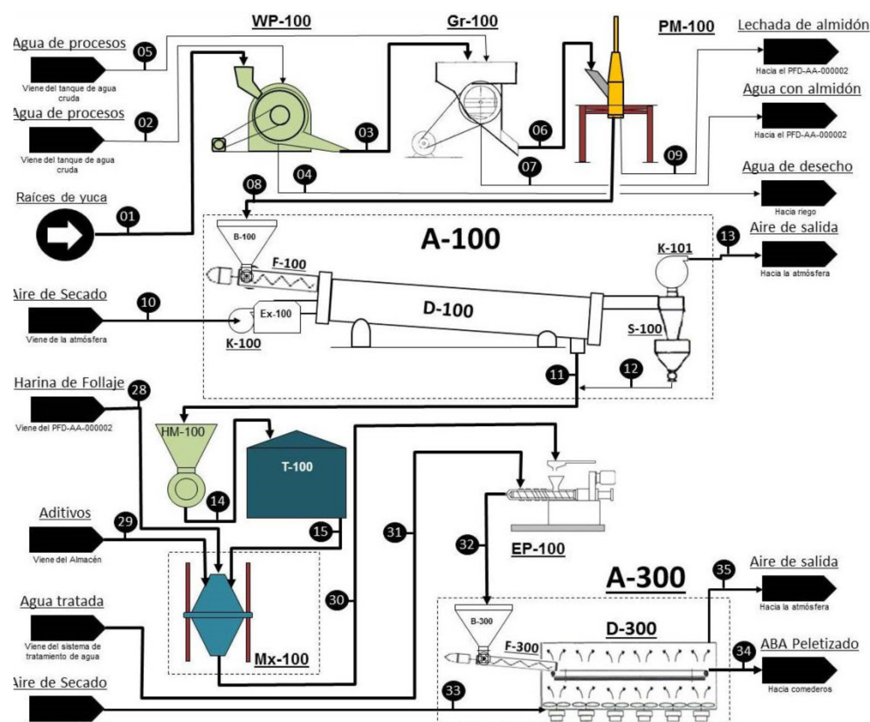


Figura 24. Diagrama de procesos, de una línea de producción para alimentos balanceados a partir de la yuca o mandioca.

En el 2018, se construye un equipo de medición de datos cinéticos experimentales de secado en capa fina[8], en el Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, el cual se muestra, en la Figura 25. Así mismo se generaron, datos cinéticos para los residuos cítricos de mayor generación en Venezuela (Mosquera y Mercado, 2018), y del pseudofruto del caujíl, marañón o anacardo, fresco y deshidratado, mediante deshidratación osmótica (Cardozo, 2018) (trabajos aún no publicados). Se estableció un nuevo modelo para simulación de secadores rotatorios, mucho más riguroso que los publicados a la fecha.

[8] La cámara de secado es una estufa de convección forzada, con reflujo de aire, Imperial V, Gravity Convection Ovens, modelo: 3476, modificada, con la incorporación de un elemento de medición de temperatura más preciso que la termocupla que ésta posee de fábrica, una PT-100, con pantalla digital incorporada, ubicando dicho elemento de medición de temperatura, justo encima de la cesta donde se coloca la muestra. También se le adaptó a la estufa, 3 temporizadores Autonics, modelo AT8N, los cuales, en modo automático, cada cierto tiempo medido en minutos, paran el ventilador de recirculación interno, por unos segundos, mientras la lectura de la balanza se estabiliza, para leer el peso de la muestra. Los minutos de los intervalos de pesada y los segundos de duración del ventilador apagado son puestos en estos temporizadores por el investigador que está haciendo la medición de la cinética. El controlador de temperatura automático fija la temperatura interna de la estufa con una precisión de 0,1 ºC, usando la PT-100 como elemento, en sustitución de la termocupla original. Para la medición de pérdida de peso en tiempo real fue acoplada en la parte superior de la estufa una balanza analítica marca OHAUS, modelo AE240, precisión ± 0,0001 g, a la cual se le colocó por la parte de abajo un gancho de acero y se colgó una cesta de metal para que esta quedara en suspensión dentro de la estufa.



Figura 25. Equipo de medición de datos cinéticos de secado en capa fina.

Ese mismo año, la Universidad Rafael Urdaneta (URU), contrata al Profesor Alexis Faneite, para dictar la Materia Diseño de Plantas, donde se simula la sección de acondicionamiento de una biorrefinería de bagazo de caña para producción de etanol vehicular, de segunda generación, integrada a la central azucarera, usando un simulador propio para el tren de secadores de transporte pneumático, el cual fue suministrado a los estudiantes. Al finalizar la materia, el Profesor fue invitado a Honduras, por parte de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), como asesor internacional Universitario en termodinámica Aplicada a la Ingeniería Química.

A finales de 2018, se crea un proyecto titulado "Diseño y Simulación de Secadores Agroindustriales", con el fin de compartir de forma consolidada el acervo científico del Profesor Faneite, en el área de secado, a la comunidad de Researchgate, y promocionar cursos en la modalidad on line, iniciando casi inmediatamente, con una primera cohorte de estudiantes. En el 2019, el programa de cursos abre la modalidad a distancia y se crea la página web.

Entre 2017 y 2020, se publican los modelos de Faneite-Suárez y Faneite-Mosquera (ver Figura 26), bautizados con los apellidos de los tesistas que participaron en el desarrollo de dichas ecuaciones de cinética de secado en capa fina, quedando para la posteridad a la disposición de la comunidad científica internacional (Morán *et al*., 2017 y Faneite *et al*., 2020, respectivamente). El Modelo de Faneite-Mosquera además, es el primero modelo empírico que viene con un método, que permite,

generar ecuaciones en función de la temperatura para sus parámetros, lo que lo hace directamente aplicable a la simulación rigurosa de secadores y a su vez, contribuye a la unión de la información generada en la investigación básica, con los avances generados en la investigación aplicada, referente a la simulación de equipos de secado.

Faneite-Suárez

$$M_{Rt} = a \cdot exp(-kt^n) + (1-a) \cdot exp(-gt^n) + bt$$

Faneite-Mosquera

$$M_{Rt} = exp[-\pi^2 \cdot bt/(L^2 + \pi^2 \cdot mt)]$$

Figura 26. Modelos de Faneite-Suárez y el Modelo de Faneite-Mosquera, de cinética de secado en capa fina, publicados en 2020.

En los 19 años y medio, desde que se formuló aquella primera meta, del **Centro de Procesos de Separación y Control de Procesos**, hasta el hoy **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, se han llevado a cabo las siguientes actividades:

Actividades de docencia universitaria y formación de tecnólogos.

1. Aumento de la vinculación de la Unidad Curricular “Laboratorio de Operaciones Unitarias II” (del 8vo semestre de Ingeniería Química en LUZ), con las competencias propias del Ingeniero de Planta y de Procesos, así como reformulación de los objetivos de la Práctica de Secadores Rotatorios, para la eliminación de vacíos y consolidación de métodos de cálculo de diseño preliminar.

2. Formación de tecnólogos, con pasantías, trabajo comunitario, tesis de pregrado y postgrado, profesionales de institución públicas de comisión de servicios, que hoy son exitoso en sus áreas laborales.

3. Creación del Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales para beneficio de los estudiantes de Ingeniería de toda Iberoamérica, el caribe e Ingenieros hispanoparlantes alrededor del mundo.

Actividades de investigación, difusión e intercambio internacional.

4. Reactivación de la investigación básica y aplicada en el Laboratorio de Ingeniería Química de LUZ, así como la Creación de una línea de investigación y una línea de pensamiento.

5. Se han propuesto, conocimientos alternativos a los paradigmas considerados limitativos al desarrollo del área de secado y en general de los bioprocesos y procesos de separación asociados a las biorrefinerías, agroindustria e industria de alimentos, generando nuevos modelos, ecuaciones y teorías que al día de hoy se siguen difundiendo en artículos y congresos.

6. Asistencia a eventos nacionales e internacionales, no mencionados:

I Congreso Internacional de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Maracaibo (Venezuela), 30 de Julio al 04 de agosto de 2006 (Faneite *et al*., 2006).

I Congreso Científico Técnico de Ingeniería. Maracaibo (Venezuela), del 04 al 09 de noviembre de 2007 (Faneite *et al*., 2007a y b).

I Congreso Internacional de Responsabilidad Social Universitaria, en el área de Ambiente y Responsabilidad Social Universitaria, en la sub-área de: La RSU: Aportes, Productos y Soluciones a Problemas Ambientales Específicos. Maracaibo (Venezuela), del 2 al 4 de noviembre de 2011.

I Encuentro Regional de Ciencia, Tecnología e Innovación - Región Occidental. Barquisimeto (Venezuela), del 11 al 14 de julio de 2013.

Encuentro Zuliano de Educación Universitaria, hacia el Desarrollo Sostenible. Maracaibo (Venezuela), del 07 al 11 de octubre de 2013 (Faneite, 2014).

II Congreso Venezolano y III Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Luz Maritza Reyes de Suárez". Maracaibo (Venezuela), del 21 al 23 de octubre de 2013 (Faneite *et al*., 2013a, b y d; Medrano *et al*., 2013).

Jornadas Virtuales de Ingeniería de Control y Automatización de Procesos. Maracaibo (Venezuela), del 30 de octubre al 01 de noviembre de 2013.

I Congreso Venezolano "Uso Racional y Eficiente de la Energía y Energías Renovables". Maracaibo (Venezuela), del 30 de octubre al 01 de noviembre de 2013 (Tudare *et al*., 2013).

II Congreso Venezolano de Ciencia, Tecnología e Innovación. Caracas (Venezuela), del 07 al 10 de noviembre de 2013.

III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil “Dra. Imelda Rincón Finol” “Investigamos e Innovamos para Venezuela”. Maracaibo

(Venezuela), del 24 al 26 de Septiembre de 2014 (Barrueta *et al*., 2014; Chourio *et al*., 2014; Hernández *et al*., 2014; Pacheco *et al*., 2014).

Foro: Discusión sobre Energías Alternativas y Uso eficiente energético (Semana del Ingeniero 2014). Maracaibo (Venezuela), 30 de octubre de 2014.

IV Encuentro Regional de Ciencia y Tecnología, Región Occidente. Maracaibo (Venezuela), del 07 al 09 de octubre de 2015.

Propuestas de Materias Primas Autóctonas, como Alternativas en la producción de Alimentos Balanceados para Animales (ABA), en la sustitución de Importaciones. Maracaibo (Venezuela), 06 de septiembre de 2016 (Faneite *et al*., 2016b).

Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química y carreras afines (COLAEIQ LATAM 2020), organizado por la Asociación Latinoamericana de Estudiantes de Ingeniería Química (ALEIQ), entre el 17 y el 21 de agosto de 2020, y llevado a cabo en modalidad virtual. Disertación: Simulación de secadores.

Actividades de extensión, salida al sector productivo, apoyo a comunidades y de relaciones interinstitucionales.

7. Creación de vínculos internacionales y consorcios de investigación y desarrollo, vigentes a la fecha.

8. Apoyo a empresas emergentes, y a varios grupos económicos privados de la región.

9. Creación de empresas de I+D+I+Formación y startup con tecnología propia (servicio de suministro de lemna seca, recolectada en el Lago).

10. Apoyo a comunidades poco asistidas de la región, transfiriéndoles tecnología blanda para su beneficio social y económico.

EL IMPACTO Y LOS BENEFICIOS DIRECTOS E INDIRECTOS, LOGRADOS HASTA LA FECHA, SON INCONMESURABLES.

Planteamiento del Problema

En los libros tradicionales de Ingeniería Química, y en los que explican el secado, no hay información clara sobre como diseñar y simular secadores industriales.

En algunos casos, solo se presentan métodos preliminares de diseño, y solo para un número limitado de secadores. Normalmente, no se presentan métodos rigurosos de diseño. En general es confuso entender todo el capítulo, luego de tener por delante, todas las operaciones unitarias, cuyas bases de diseño, se basan en el

equilibrio de fases, como por ejemplo, la destilación, la extracción líquido-líquido, la absorción gaseosa, entre otras. Hay una compilación de información que rápidamente se vuelve obsoleta debido al incremento de la investigación en el tema.

En la archiconocida obra de McCabe *et al*. (1991), básica para la enseñanza de la Ingeniería Química, se presentan los fundamentos básicos del secado, incluyendo ciertas ecuaciones para especificación de algunos parámetros de secadores por aspersión, sin que se presente un método para su diseño.

En la obra de Treybal (2001), otro libro básico para la enseñanza de la Ingeniería Química, se explican en general, los mismos fenómenos del secado, que explica el McCabe *et al*. (1991), incluyendo, una descripción somera, de los distintos tipos de secadores, haciendo énfasis en el secador rotatorio continuo, para el cual, se ofrece un método preliminar de diseño, basando en el número de unidades de transferencia de calor, la longitud de la unidad de transferencia de calor y el establecimiento de un perfil de temperatura. Es más apropiado para minerales y el coeficiente de transferencia de calor es susceptible a la carga volumétrica de sólido en el secador, lo cual se comprobó con los estudios con *Lemna obscura* (Faneite *et al*., 2007b y 2010). Este método está limitado a materiales de construcción, minerales y otros que tengan un periodo de velocidad constante en su proceso de secado, periodo no visto en los materiales vegetales en general. Es importante decir que de existir esta región límite, las humedades críticas (que limitan el periodo de velocidad constante de secado), no son independientes con la temperatura, y esto, no lo dice el libro.

Libros más específicos de procesamiento de alimentos, como el libro de Ibarz y Barboza-Cánovas (2003), contiene igualmente fundamentos básicos del secado, incluyendo, el desarrollo de ecuaciones de balance de masa para algunos tipos de secadores y algunas ecuaciones de diseño, sin embargo, no se especifican métodos de dimensionamiento de forma explícita. No se podría diseñar, solamente con este libro. Por otro lado, en la obra de Brennan y Grandison (2012), se presenta igualmente una introducción genérica del secado, ya vista en los libros anteriores, pero solo describe someramente los principios de funcionamiento de algunos tipos de secadores.

El libro más útil a la fecha, para el diseño y simulación rigurosa de secadores industriales, es el Mujumdar (2006), en donde se presentan, ecuaciones fundamentales para una gran variedad de secadores industriales, sin embargo, no se explica la manera de conectar estas ecuaciones fundamentales, en un sistema de ecuaciones, que genere resultados de salida, a partir de especificaciones de dimensiones y condiciones de operación, que es el principio de la simulación

rigurosa, requerida para el diseño formal de plantas industriales. Las carátulas de los libros antes mencionados, se muestran en la Figura 27.

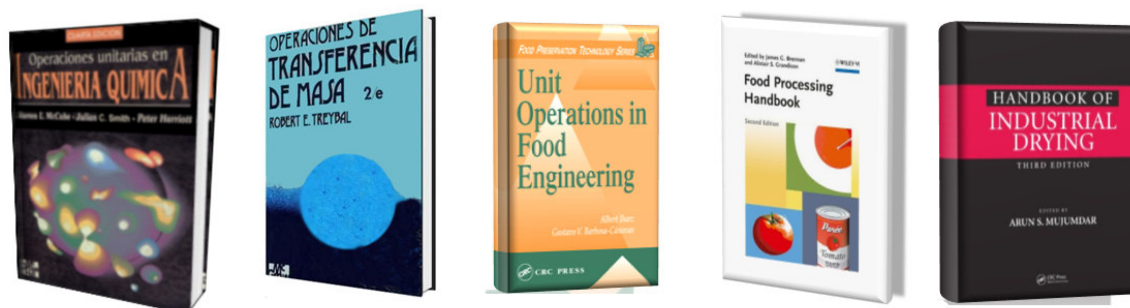


Figura 27. Carátulas de libros, de izquierda a derecha, McCabe – Smith – Harriott (1991); Traybal (2001); Ibarz – Barboza-Cánovas (2003); Brennan – Grandison (2012); y Mujumdar (2006).

En los cursos de Operaciones Unitarias, el tema no se toca con profundidad ya que prevalecen los procesos de separación basados en datos de equilibrio de fases. El tiempo dedicado a destilación y la explicación de los métodos McCabe-Thiele y Ponchón-Savarith, ocupan buena parte de la materia. El final de la materia es dedicado a otras operaciones Unitarias cuya jerga y representación gráfica es diferente, y esta falta de homogeneidad, le resta eficiencia al dictado de la asignatura. En Operaciones Unitarias III, o la segunda parte de Proceso de Separación, se vuelven a explicar métodos equivalentes para otros procesos de separación (extracción líquido-líquido, lixiviación), pero igualmente, con jerga y representaciones gráficas diferentes. En ocasiones inclusive, el secado, no se toca, a pesar de que esté en el Programa.

Los secadores que se venden en la actualidad, por otro lado, están hechos a la medida de materiales específicos, pero ya empiezan a surgir nuevos materiales, requeridos para la conformación de biorrefinerías y por ende bioeconomías, que necesitan de un proceso de secado industrial, para su almacenamiento y transporte a bajo costo. Solo con el valor de toneladas/hora de agua eliminada, que es la única variable que consideran importante los constructores, para dimensionar un secador, no pueden diseñarse las nuevas aplicaciones requeridas. Los secadores actuales, provienen de corridas experimentales a diferentes escalas y no de procesos de diseño riguroso. Evidentemente, son equipos sobredimensionados para poder ser tan versátiles, como se declaran, en cuanto a la cantidad de materiales que se pueden secar en ellos, siendo su premisa de diseño, el secado a elevadas temperaturas, en cuyo caso, la cinética de secado, no juega un papel importante, sin embargo, en materiales sensibles al calor y en el secado a temperaturas

moderadas, la cinética de secado, es el fenómeno fundamental que gobierna el proceso y por lo tanto, debe ser tomada en cuenta.

Es un proceso a la inversa, primero se construye el equipo y luego se ve si funciona. Esto ya no se justifica, por el hecho de que ya se cuenta con los conocimientos para no tener que saltarse esta etapa de diseño.

Una de las tantas empresas que comercializan secadores por internet, en un portal archiconocido, declara que sus secadores rotatorios, sirven para aserrín de madera, alfalfa, paja, caléndula, virutas de madera, residuos de mandioca, bagazo, pastel de colza y hojas, etc., en función únicamente de la cantidad de agua retirada por hora, tal como se aprecia en la Figura 28.

Parámetros del producto

Modelo	Poder (Kw)	La capacidad de (T/h)
600 × 6000	3	0,5-1,5
800 × 8000	4	0,8-2,0
800 × 10000	4	0,8-2,5
1000 × 10000	5,5	1,0-3,5
1200 × 10000	7,5	1,8-5
1200 × 12000	11	2-6
1500 × 12000	15	3,5-9
1800 × 12000	18	5-12
2200 × 12000	18,5	6-15
2200 × 18000	22	10-18
2200 × 20000	30	12-20
2400 × 20000	37	18-30
3000 × 20000	55	25-35
3000 × 25000	75	32-40

Materiales aplicables

Figura 28. Especificaciones de un fabricante de secadores rotatorios (izquierda), para distintas biomasas (derecha), vendidos en internet (Fuente: alibaba.com).

El software que declaran para la simulación de sus equipos, es un programa de dibujo asistido por computadora (CAD, por sus siglas en ingles), y no un simulador de proceso, por lo que el diseño de detalle, no proviene de una ingeniería básica, como debe de ser. El precio FOB (Incoterm Free On Board, o lo que es lo mismo, el vendedor, corre con los gastos de movilización hasta el puerto de embarque), del equipo de mayor capacidad, ronda los 160 000 dólares americanos (USD), por lo que un error en la selección, sería catastrófico para cualquier carrera profesional.

Para este caso específico, para garantizar el secado del un material de interés cualquiera, pudiera tener que adquirirse otro equipo de reducción de tamaño para que el “cliente se adapte al vendedor” y no viceversa, como debe ser.

Existe una desconexión entre la investigación básica del secado y la investigación aplicada. Trabajos reportados hasta julio de 2020, reportan modelos de cinética de secado en capa fina, para diferentes materiales, con parámetros individuales para cada temperatura estudiada.

En la Figura 29A, se presentan resultados parciales de Keskes *et al*. (2020), quienes secaron un polvo farmacéutico, con un principio activo llamado Candesartan Cilexetil; en la Figura 29B, se presentan resultados parciales de Kamal *et al*. (2020), quienes secaron ñame en rodajas, y en la Figura 29C, los resultados parciales de Puente-Díaz *et al*. (2020), quienes secaron películas de puré de uchuva.

A

Keskes *et al*., 2020

	Parámetros		
$T/°C$	k		a
60	1.00944	Henderson y Pabis	0.99991
50	0.58475	$M_R = a\exp\left(-kt^n\right)$	0.99858
40	0.21898		0.99746

B

Kamal *et al*., 2020

Modelo	Constantes del modelo y coeficientes	Temperaturas de secado 50°C	60°C	70°C	80°C
Henderson y Pabis	k	0.2264	0.3012	0.3442	0.4516
($MR = ae^{-kt}$)	a	1.0943	1.1201	1.1498	1.1227

C

Puente-Díaz et al., 2020

Modelo	Parámetros	Temperatura (°C)—Mylar™ Altura de capa (mm) 60—0.19	60—0.25	60—0.29
Henderson–Pabis	a	$0.1 \pm 1.8\times10^{-3}$	$1.1 \pm 1.3\times10^{-2}$	$1.1 \pm 5.1\times10^{-3}$
$MR = a\cdot\exp(-kt)$	k	$2.0\times10^{-4} \pm 1.4\times10^{-5}$	$2.1\times10^{-4} \pm 6.7\times10^{-6}$	$2.1\times10^{-4} \pm 3.0\times10^{-6}$

Figura 29. Parámetros del modelo de secado en capa fina de Henderson y Pabis, para trabajos publicados en 2020, (A) Keskes *et al*. (2020); (B) Kamal *et al*. (2020); y (C) Puente-Díaz *et al*. (2020).

Estos tres trabajos, reportaron entre sus modelos cinéticos de secado en capa fina utilizados, el de Henderson y Pabis, cuyos parámetros, se muestran en la Figura 29. Tal como se mencionó anteriormente, todos reportaron parámetros para cada temperatura estudiada. Esto, impide su uso en la simulación, ya que la simulación rigurosa requiere modelos con parámetros independientes de lo temperatura. Puente-Díaz *et al*. (2020), en especial, reportan rangos de valores para los parámetros, siendo las razones por las cuales reportan parámetros de esta forma, bastante confusas y desconcertaste.

No se muestran, en los resultados de la figura, los estadísticos de desempeño del modelo, a propósito, para no causar ruido de lo que se quiere transmitir, pero esto se explicará al detalle en el Módulo 2, así como a hallar los parámetros de las ecuaciones de cinética de secado en capa fina, incluyendo, el modelado con la nueva ecuación de Faneite-Mosquera, cuyo método de determinación de parámetros, permite que sean continuos con la Temperatura, y por lo tanto, aplicable directamente a la simulación de secadores industriales.

En cuanto a los simuladores, se puede afirmar, que son ambientes informáticos de recreación de procesos de la vida real, con algoritmos que permiten ver, virtualmente, su evolución en el tiempo o su condición en un estado determinado, a través de modelos matemáticos y cálculos complejos, siendo los beneficios principales, el entrenamiento de personal, el diseño de nuevos procesos o la mejora de procesos existentes.

Normalmente cada una de las operaciones que componen dicho proceso, se visualizan en forma de módulos o cajas, que representan un equipo, los cuales se unen, por medio de flechas que indican el flujo de materia, siendo posible en algunos casos, indicar también el flujo de energía para llevar a cabo optimizaciones energéticas. Como paso previo a la simulación, se deben especificar las materias primas y productos esperados. Cabe destacar que el simulador, no asigna de forma autónoma, valores coherentes de flujos y condiciones, por lo que un sólido conocimiento en los fundamentos que gobiernan los cambios dentro de los equipos, es requerido, por parte del usuario.

El manejo de cada software es tan amigable como la complejidad de las operaciones involucradas lo permitan, sin embargo, su manejo no es tan complejo como la formación requerida para la construcción del proceso, la ejecución de las corridas y la interpretación de los resultados. Algunos de ellos como el ASPEN Plus, permite hacer cálculos económicos simultáneos, igualmente, algunos de ellos permiten la exportación e importación de datos de otros paquetes de cálculo como Mathcad o Excel.

Como todo software, los simuladores de procesos, no se escapan de la máxima que dice: **"*basura entra y basura sale*"**, lo que implica que la sofisticación del programa no lo limita a que genere resultados erróneos si el operario del simulador introduce datos erróneos. Aspen permite el modelado de dos y tres dimensiones, pero para equipos individuales a través de su ambiente de dinámica de fluidos computacional (CFD). Esta última técnica, se usa solamente, para equipos donde el patrón de flujo interno, gobierna los procesos de reacción y separación, como por ejemplo, en el caso del secador por aspersión.

Aspen Plus entró al mercado en 1982 comercializado por la empresa Aspen Technology, Inc. (AspenTech), que fue fundada en 1981 en Massachusset (Estados Unidos de Norteamérica). El 25 de mayo de 2016, Aspen saca al mercado la versión 9, que ya trae módulos de simulación de secadores industriales, 34 años después de sacar al mercado su primera versión de su simulador de procesos.

El resto de los simuladores comerciales, tales como ProII, Dwsim, Emso, Chemcad, HSC Sim, y Hysys, no cuentan con dichos módulos (ver Figura 30).

Es importante que la simulación de secadores, se haga dentro de ambientes de procesos, para poder hacer optimizaciones y análisis de sensibilidad sin tener que estar exportando e importando datos de un programa a otro, lo que es tedioso y limita la cantidad de simulaciones efectivas que se puedan llevar a cabo, así mismo, limita la visión holística del proceso que debe tener el Ingeniero.



Figura 30. Logotipos de Simuladores comerciales más ampliamente usados (*arriba*). Módulo de secador Rotatorio de ASPEN V9 (*abajo*).

Los fenómenos que gobiernan el transporte del agua dentro del sólido, y el efecto sobre el sólido del paso el agua a través de él, durante el secado, por otro lado, aún está en proceso de investigación. En la Figura 31, arriba a la izquierda, se muestra una curva típica de velocidad de secado (humedad en el eje *x*, y velocidad de secado en el eje *y*), la cual se encuentra, en cualquiera de los libros, antes mencionados. Todas las etapas que se aprecian, tienen ya una explicación teórica, validada, con excepción, del último tramo, que explica en general, las curvas para materiales de origen biológico, tal como las curvas de velocidad de secado, que se aprecian en la parte superior derecha, y que no están explicadas en dicha bibliografía, y que corresponden a un material vegetal.

Técnicas que se han usado para definir los procesos que ocurren durante el secado son Espectrofotometría infrarroja con transformada de Furier (FTIR, por sus siglas

en inglés), difracción de Rayos X, estudio de la cinética de secado de materiales deshidratados y vueltos a hidratar, y modificados química y físicamente (Faneite, 2010).

Finalmente, el fenómeno de difusión del agua a través del sólido, se ha aceptado como fickciano, teniendo como base la segunda ley de fick de la difusividad. Sin embargo, no hay uniformidad en las ecuaciones para el coeficiente de difusión, para materiales cuya base química son los polisacáridos. Dos ejemplos de ecuaciones el coeficiente de difusión para materiales vegetales, pueden ser apreciados en la parte de abajo de la Figura 31, siendo no solo matemáticamente diferentes, sino también, deducidos a partir de bases teóricas diferentes.

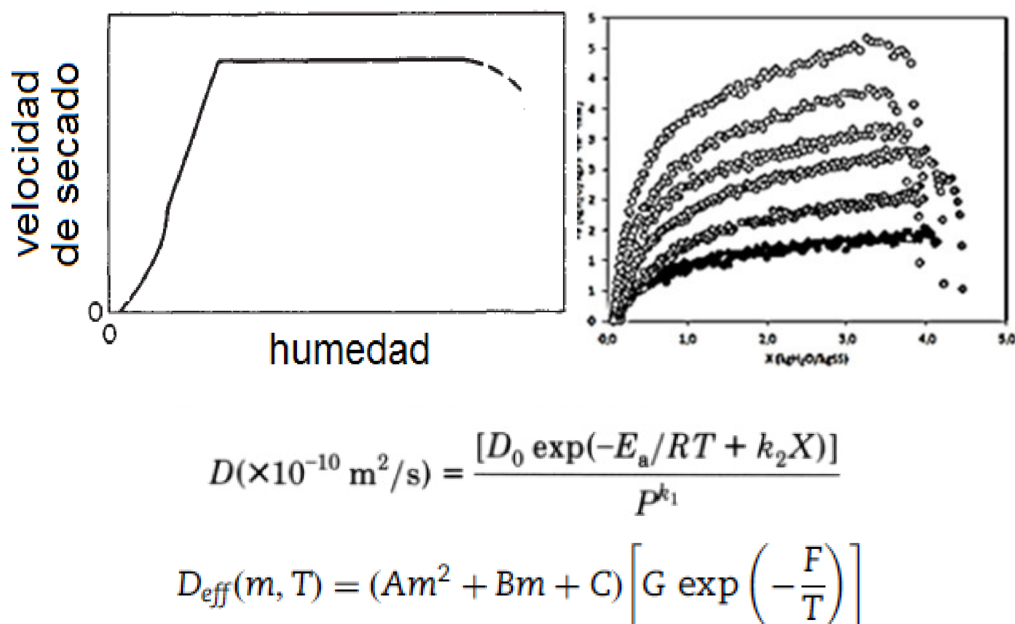


Figura 31. Curvas de velocidad de secado, típica explicada en la bibliografía tradicional (Moyers y Baldwin, 1997) (*arriba/izquierda*), de un material vegetal (Mosquera y Mercado, 2018) (*arriba/derecha*), Ecuaciones de coeficiente de difusión de Karathanos *et al*. (1991) (*primera de arriba hacia abajo*) y de Esmaiili *et al*. (2007) (*segunda de arriba hacia abajo*).

Justificación del Programa

La humanidad tiene mucho tiempo secando productos, como pescados, carnes, frutas, etc., en principio, para consumo familiar o comunal, de tal forma de poder almacenar dichos insumos por un periodo de tiempo prolongado, a condiciones ambientales, en particular, en aquellos ambientes donde la actividad microbiana se

ve favorecida, así mismo para disminuir su peso y volumen, y por lo tanto, disminuir la energía y espacio requeridos para su transporte y almacenado, respectivamente.

El secado hoy en día, sigue siendo una operación de suma importancia para el normal desenvolvimiento de la sociedad moderna. Muchos productos que consumimos, deben ser secados para su transporte y almacenaje a bajo costo. Dichos productos, normalmente, se producen en lugares cercanos a la generación de la materia prima, y se distribuyen a escala regional, nacional e internacional, por vía aérea, marítima o terrestre.

En la Figura 32, se muestran algunos ejemplos de productos que se transportan y comercializan secos, para consumo de la sociedad moderna, y que de seguro cuentas con alguno de ellos o todos, en tu lugar de residencia. Estos son, condimentos, harinas, café en polvo, principios activos y excipientes de comprimidos, grageas y cápsulas, pastillas o píldoras. No mostrados en la foto, pero igualmente, ejemplos de productos de uso masivo, comercializados de forma seca, tenemos, pastificios, polvos cosméticos y de cuidado personal, comida para animales, granos y cereales, leche en polvo, azúcar refinada, minerales y materiales de construcción (con los que fue construido el espacio en donde te encuentras en este momento), fertilizantes, fibras, papel, y plásticos, entre otros.



Figura 32. Algunos materiales que se comercializan secos en la actualidad, de izquierda a derecha, condimentos, harinas, café y pastillas (Fuente: pixabay.com).

La bioeconomía, por otro lado, se puede definir como el conjunto de actividades relacionadas con el desarrollo, producción y utilización de productos y procesos biológicos renovables y la conversión de estos recursos y flujos de residuos en otros de valor añadido, bioproductos y bioenergía (Mestre, 2018). Representa un concepto que complementa un concepto más amplio, relacionado con la economía circular, sostenible e hipocarbónica, cuyo objetivo es mantener el valor de los productos, materiales y recursos en el ciclo económico durante el mayor tiempo posible, y reducir al mínimo la generación de residuos (Mestre, 2018).

La extraordinaria riqueza en biodiversidad de Latinoamérica y el Caribe, y su gran capacidad de producción de biomasa, ofrecen un enorme potencial para la

producción y transformación de productos y representa una coyuntura estratégica para promover la diversificación productiva agrícola y agroindustrial, siendo la región, líder en la producción de bioenergía, teniendo a Argentina, Brasil y Colombia, como los países más avanzados en este campo, y existiendo esfuerzos ampliamente conocidos para institucionalizar la valorización de la biodiversidad (Hodson, 2018).

Por otro lado, la Iniciativa Tecnológica Conjunta de Bioindustrias (JTI-BBI), partenariado público privado entre la Comisión Europea y el Consorcio de Bioindustrias (BIC) creado en 2014 para potenciar la Bioeconomía Europea, y enmarcada en el Reto Social 2 de Bioeconomía en H2020, persigue reducir la dependencia europea en combustibles fósiles y sus productos derivados. El eje de esta iniciativa es el desarrollo de nuevas biorrefinerías que permitan transformar, mediante un aprovechamiento en cascada, los recursos renovables naturales en productos, materiales y combustibles de base biológica (Mestre, 2018).

El movimiento liderado por Europa y otras grandes economías emergentes, de transitar hacia una economía mundial circular, sostenible e hipocarbónica, no deja motivo a la duda de que el mundo en su totalidad, comenzará a andar el camino, inicialmente hacia el establecimiento de bioeconomías, requiriendo Ingenieros con sólida formación en el procesamiento de biomateriales (que parten del secado de estos y que se imparte en este Programa Internacional de Cursos, orientado principalmente hacia este tipo de materiales), con el fin de sustituir los productos de uso masivo, por nuevos productos biodegradables o provenientes de recursos renovables, hasta ahora poco o subutilizados.

El mundo científico, basado en la necesidad de un mundo cada vez más racional, en el uso de los recursos que la naturaleza provee, ha estado generando datos de cinética de secado, para aplicaciones industriales futuras.

Haciendo una búsqueda sumamente específica, tal como se observa en la Figura 33, con el google académico, del 2000 hacia acá, poniendo como patrón de búsqueda: “Modelos de capa fina”, junto con “cinética de secado”, se consigue 854 resultados, que representan, 854 trabajos, no filtrados, relacionados con el estudio básico de la cinética de secado de materiales, que se presume que sean nuevos materiales de interés, por el periodo de tiempo especificado. Esto sugiere, que dichos materiales, ya fueron visualizados como materias primas potenciales para su industrialización en el futuro próximo y para los cuales, no existen secadores diseñados específicamente para ellos, en la actualidad.

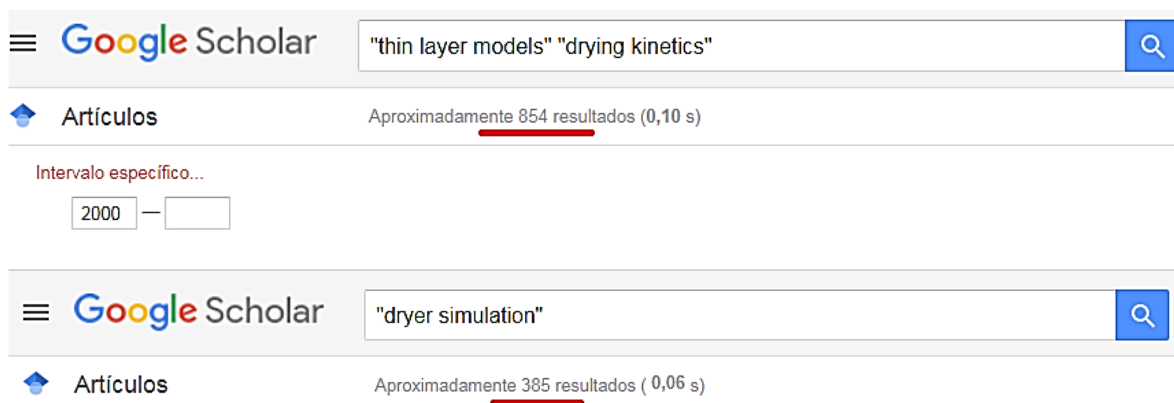


Figura 33. Número de materiales estudiados desde el 2000 hacia acá, en cuanto a su cinética de secado (arriba) y estudios en simulación de secadores (abajo).

Esto se valida parcialmente, si hacemos una búsqueda con las mismas características, pero con el patrón de búsqueda "Simulación de secadores", del cual se generan 385 resultados. Esto demuestra, a grandes rasgos y sin una revisión exhaustiva, que menos de la mitad de estos materiales se han simulado. Pudiera ser el caso, de que alguno de los participantes de este Programa Internacional de Cursos, trabaje en el futuro, en algún proyecto importante de simulación de estos procesos y en el diseño de estos equipos.

La educación tradicional de procesos de separación industrial (operaciones unitarias para Ingeniería Química), por otra parte, está amarrada a los conceptos del número de etapas de transferencia y a la longitud de la unidad de transferencia, que además, usa como base, los datos termodinámicos de equilibrio de fases, especialmente para destilación, absorción, extracción líquido-líquido y lixiviación. Hay que destacar que estos métodos, son exclusivos para el entendimiento de los fenómenos que gobiernan dichos procesos de separación, ya que son considerados como métodos preliminares y no métodos de diseño final, tomando en cuenta que para esta última actividad, se usan los simuladores y los cálculos rigurosos.

Existe un vacío en las operaciones unitarias cuya base de diseño, son los datos cinéticos.

Si bien, hay un método en operaciones unitarias, para el diseño de secadores rotatorios, el cual se basa en los perfiles de temperatura, estos perfiles no se generan en materiales de origen biológico, por lo tanto, hay que actualizar estos métodos e incorporar métodos para el resto de los secadores, pudiendo dejar a la simulación rigurosa, para estudios de cuarto nivel.

La tendencia mundial actual a aprovechar los recursos renovables, en el área industrial, implica que las operaciones unitarias con base a datos cinéticos, deben

ser incorporadas a los estudios formales de la Ingeniería, ya que existen suficientes conocimientos, tecnologías y Académicos, preparados en el área.

El hecho de que los programas educativos de las Universidades, estén rezagados, en relación a los avances científicos sobre la simulación y diseño riguroso de secadores industriales, los cuales han permitido pasar, de modelos tipo caja negra, a modelos tipo caja gris, no justifica que los Universitarios no egresen con estos conocimientos, o que el egresado, no esté actualizado en el tema.

Las industrias en donde el secado, es el proceso principal o aquellas donde se usa para el acondicionamiento de la materia prima o el refinamiento de los productos principales, demandan cada día Ingenieros más preparados, que aborden las tareas de diseño, operación, mantenimiento y optimización, de las operaciones involucradas, con total maestría. No ver con detalle estos temas en la Universidad, no justifica la falta de preparación en el área.

En el mundo de la investigación básica y aplicada, por otro lado, son requeridos también profesionales, no solo con los conocimientos, sino con las competencias para abordar los retos que subyacen en la generación de nuevos conocimientos y tecnologías, útiles a la humanidad.

La decisión personal de capacitarse, enmarcada en la competencia individual de autodesarrollo, más allá de lo aprendido, en los estudios formales, es bien visto en el mundo laboral y científico, e inicia la adquisición de nuevas competencias, útiles para tener un alto desempeño en el mundo del ejercicio profesional.

Tampoco se justifica que en las Ingenierías relacionadas al proceso de secado industrial, diferentes a la Química, como Alimentos, Agronómica, Agroindustrial, Forestal, Petroquímica, en Minería, Civil, Ambiente, Mecánica e Industrial, y que serán usurarios de estos procesos, no manejen con claridad, los fenómenos y modelos que los gobiernan, ya que el trabajo del ingeniero es normalmente multidisciplinario, y en algunos casos, debe incorporar en su haber, competencias adicionales, bien por motivación propia o bien porque lo demanden las circunstancias o la empresa para la cual labora.

Objetivo del Programa

El objetivo del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, es difundir, de forma bien estructurada, hacia el acervo colectivo de la Ingeniería, los fundamentos del secado, con énfasis en materiales de origen biológico, así como los fundamentos y el diseño y simulación rigurosa de secadores industriales, generados en el mundo científico, con el fin de actualizar desde afuera, pero con el más elevado criterio academicista,

los *pensa* de estudio desactualizados, a través de un proceso formativo basado en competencias, apoyado en formatos educativo/culturales modernos y altamente tecnológicos, con los más altos estándares de calidad educativa, y a un precio accesible al Universitario y Profesional de la Ingeniería de habla castellana.

Estado del arte de la simulación de secadores en ambientes de simulación

Este estado del arte, estará circunscrito a la simulación de secadores industriales, dentro de ambientes de simulación de procesos, en una dimensión y en estado estacionario, excluyendo de esta forma, simulación en dos y tres dimensiones (como por ejemplo, aquellas que usan Dinámica de Fluidos Computacional o CFD, por sus siglas en inglés), o en programas de cálculo de ingeniería, como mathlab, mathcad, excel, en lenguajes de programación como fortran, basic, etc, o programas específicos para simulación de secadores, como DryerDesigner, DryPak, Hpdyer, SMFGD, que en general, están en fase de prototipo. También se excluye, la simulación en estado no estacionario o dinámica, simulación de secadores solares y de prototipos de secadores.

Sin embargo, iniciaremos, con el trabajo seminal, en “simulación de secadores”, reportado por el buscador científico Google Académico, el cual corresponde a un reporte del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica, en colaboración con la Universidad de Pardue, de Thompson *et al*. (1969), el cual, es un resumen de una tesis doctoral no concluía. Thomas Thompson es el mismo creador del popular modelo de cinética de secado en capa fina de Thompson, publicado en 1968, mostrado en la Figura 34.

En este trabajo, se comparó el desempeño de 3 tipos de secadores continuos de capa profunda, de flujo cruzado, cocorriente y contracorriente, para maíz en granos, cuyos esquemas, se aprecian en la Figura 34. La validación del modelo de simulación se llevó a cabo con el esquema cocorriente, usando varias temperaturas de entradas de aire y midiendo la temperatura dentro del lecho, a varias alturas, resultando en una predicción excelente. Para simular estos secadores, se usó el lenguaje de programación Fortran.

$$t = a \cdot ln(M_{Rt}) + b[ln(M_{Rt})]^2$$

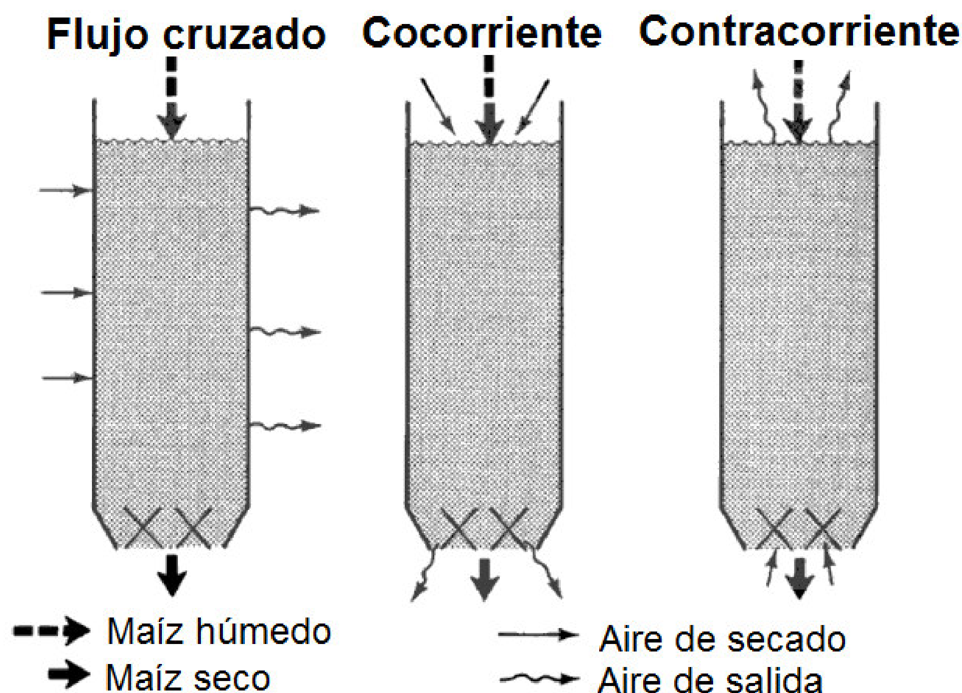


Figura 34. *Arriba*, Ecuación de Thompson, *abajo*, esquemas de secado para el maíz en lecho profundo (Thompson *et al*., 1969).

El desempeño de los 3 tipos de secadores, se midió en términos de calidad del grano: fragilidad y moliendabilidad en húmedo. Para cada tipo de secador, se encontraron deficiencias y virtudes. El de flujo cruzado produce un sobresecado en los granos en contacto con el aire de secado y un secado pobre en los granos en contacto con el aire de salida, lo que lo hace poco deseable para su uso en este proceso. Los otros dos tipos, sí secan los granos de forma homogénea. El proceso a contracorriente es el que remueve mayor cantidad de humedad de los tres, sin embargo, genera estrés térmico al final, ya que los granos más secos, están en contacto con el aire más caliente. En el proceso a cocorriente, la mayor cantidad de agua removida, ocurre al principio y las etapas finales de atemperamiento, alivian un poco el estrés térmico.

Con la herramienta de simulación creada, se optimizaron las condiciones y el diseño de cada uno de los secadores.

El ambiente de simulación WBCSim (Wood-Based Composites Simulator), para la simulación de los procesos de producción de *composites* de base madera[9], fue

[9] Shi y Walker (2006), definen los materiales compuestos a base de madera, algunas veces llamados composites, como una mezcla heterogénea de residuos de madera (elemento de refuerzo), con un adhesivo termoendurecible (elemento de cohesión). Los componentes de cohesión envuelven y unen los componentes de refuerzo (o simplemente refuerzos) manteniendo la rigidez y la posición de estos. Los

descrito por primera vez, por Goel *et al*. (1999), como un prototipo, explicando, que tiene 3 módulos, uno de simulación de secadores rotatorios (RDS), otro de prensado por radiofrecuencia, y otro de análisis de los materiales compuestos. El módulo de simulación de secadores rotatorios, está basado en los trabajos de Kamke y Wilson (1986a y b). Las partículas de madera húmedas se mezclan directamente con gases de combustión calientes. El módulo RDS predice el contenido de humedad de las partículas, la temperatura, la composición del gas, el tiempo acumulativo y el consumo de energía. A través de Fortran, es posible incorporar algoritmos particulares, según la necesidad de simulación del usuario.

Ramakrishnan *et al*. (2002), reportaron que aún era considerado un prototipo, para el 2002, pero ya había incorporado un módulo adicional para el proceso de formación de tableros, el cual, es el proceso de depositar escamas de madera y luego comprimirlas. Los autores, declararon a su vez que, en el 90% de las aplicaciones, se debe usar el secado con el secador rotatorio.

Shu *et al*. (2004), declaran que a la fecha, el simulador ya contaba con 5 módulos. El módulo de formación de tableros se mejoró hacia un módulo de formación de tableros de filamento orientado, y se incluyó un módulo de compresión caliente. Se añade un componente de gestión de experimentos (EM) desarrollado para el entorno de resolución de problemas WBCSim, con una interfaz gráfica, basada en la web. El avance más importante de este componente, es que permite almacenar de forma sistémica, los resultados de las simulaciones de quienes lo usen, quedando disponibles para otros usuarios. Se considera una evolución del programa, el hecho de pasar, de ser orientado a experimentos, a ser orientado a fabricantes. A los fabricantes les gusta ver cómo se pueden optimizar las propiedades del producto mientras se maximizan las ganancias. La gran cantidad de información almacenada, permitiría encontrar la solución de una optimización, más rápidamente.

En el 2006, se declara la incorporación de un 6to módulo, de Análisis del Material compuesto, con el fin de evaluar el comportamiento de tensión y deformación y las propiedades de resistencia de los materiales laminados. El antiguo módulo, con el mismo nombre, sería reemplazado. Igualmente, se declaró, que el WBCSim es un prototipo de entorno de resolución de problemas (PSE) basado en la web (tal como se aprecia, para la interfaz del módulo RDS en la Figura 35), desarrollado para ayudar a los fabricantes y científicos en el diseño y la fabricación de productos

---

refuerzos dotan al conjunto con unas propiedades físicas que mejoran la cohesión y la rigidez. Uno de los primeros composites fue el adobe para construcción de las casas, siendo la arcilla, el material de cohesión, y la paja, el de refuerzo. Los tableros de fibra de densidad media (MDF, por sus siglas en inglés), son un ejemplo de estos materiales.

compuestos seleccionados a base de madera (Kamke *et al*., 2006; y Shu *et al*., 2006).

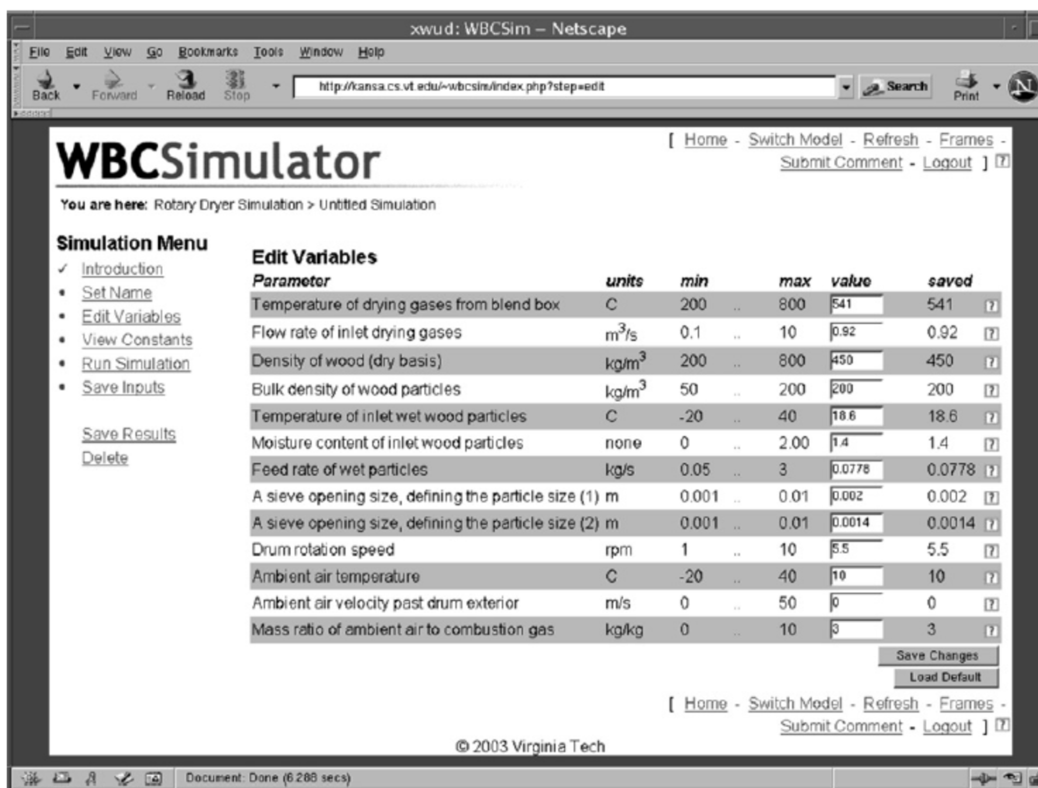


Figura 35. Interfaz de usuario del Módulo RDS del simulador WBCSim.

En el 2008, se declara la eliminación del módulo de análisis de material compuesto anterior, y se adapta una hoja de datos XML para cada uno de los 5 módulos restantes. La capa de interfaz WBCSim, los scripts (secuencia de comandos) del servidor y el sistema de administración de la base de datos utilizan esta hoja de datos XML para mejorar la usabilidad y el mantenimiento de las tres capas: cliente, servidor, desarrollador, que comprenden el sistema WBCSim (Shu *et al*., 2008).

Deshpande *et al*. (2011), plantearon una técnica de optimización que minimiza el tiempo de simulación, al usar un enfoque del diseño de experimentos. Con los resultados obtenidos, se crea un modelo sustituto, con el cual se hace la optimización, sin necesidad de barrer todo el rango de trabajo, que ese quiere evaluar, con simulaciones. Para el ejercicio de optimizar las variables operacionales del secador, se escogieron 3 de las 13 variables disponibles en el programa, las cuales fueron, la temperatura de gas de secado, el flujo de gas de secado y la velocidad de rotación. El problema de optimización, consistió en minimizar la función objetivo del tiempo acumulativo (tiempo de residencia, sin tomar en cuenta etapas de enfriamiento o atemperamiento en trenes de secadores). Los resultados

demostraron que la metodología propuesta redujo drásticamente el número total de llamadas a las costosas ejecuciones de simulación, durante el proceso de optimización.

En el contexto de ambientes de simulación para plantas de producción de papel, Hytönen y Puumalainen (2006), implementaron un modelo físico de secador de cilindro y por “impacto de corriente de aire caliente”[10] (ver Figura 36), para papel, en el ambiente de simulación comercial en estado estacionario, BALAS®, para evaluar las influencias del secado por “impacto de corriente de aire caliente” en la energía de una planta de papel. BALAS® permite por defecto simular secadores de cilindro. Se simularon tres módulos de secado: (1) secado de cilindro convencional simple (ver Figura 36), y dos nuevas configuraciones de secado combinado de (2) cilindro con “impacto de corriente de aire caliente” y (3) cilindro en vacío con “impacto de corriente de aire caliente”.

Los nuevos módulos, se modelaron basados principalmente en un simulador antiguo para secadores (PaperNova), de la misma empresa VTT, creadora de BALAS®, al igual que datos de la literatura sobre secado del papel, transferencia de calor y técnicas de modelado matemático.

El caso base simulado (secado de cilindro convencional) representa bien una fábrica de papel típica. Debido a que los parámetros reales del secador no estaban disponibles, la validación real no fue posible, pero todos los valores estimados produjeron tasas de secado y perfiles de temperatura conocidos. Además, la eficiencia de secado de los casos de secado por “impacto de corriente de aire caliente” simulados, corresponde bien al conocimiento común. Para una validación precisa, se deben realizar mediciones exhaustivas de las variables de todos los

---

[10] El secado por “impacto de corriente de aire caliente”, es un tipo de secado en donde chorros calientes de aire, se dirigen normalmente a lechos fino de gránulos transportados en un transportador de movimiento lento. Los chorros pseudofluidizan el lecho, para asegurar un buen contacto gas-sólido necesario para un secado efectivo. Los chorros impactantes de varias configuraciones se usan comúnmente en numerosas operaciones de secado industrial que implican el secado rápido de materiales en forma de láminas continuas (por ejemplo, papel de seda, película fotográfica, papel recubierto, no tejidos y textiles) u hojas relativamente grandes y delgadas (p. ej., chapa, madera y alfombras), o incluso camas de gránulos gruesos (p. ej., comida para perros o gatos) (Mujumdar, 2006).
Se debe elegir un sistema de secado por “impacto de corriente de aire caliente” solo si el producto está en una forma, que pueda someterse a una multiplicidad de chorros calientes dirigidos normalmente (o casi normalmente) sobre una o ambas superficies. En la mayoría de los casos, el material que se seca, se apoya en un transportador o rodillo, y en otros se usan bandas Debido a su compleja fabricación y los altos costos de manejo del aire (debido a la alta caída de presión de la boquilla y la alta relación de reciclaje necesaria para lograr eficiencias térmicas razonables), los secadores de impacto solo se recomiendan (o principalmente) para eliminar la humedad no ligada. Típicamente, la velocidad y la temperatura del chorro pueden variar de 10 a 100 m/s y de 100 a 350 ° C, respectivamente, dependiendo del producto (Mujumdar, 2006).

componentes y corrientes del secador, por lo cual, no se llegaron a resultados concluyentes (Hytönen y Puumalainen, 2006).

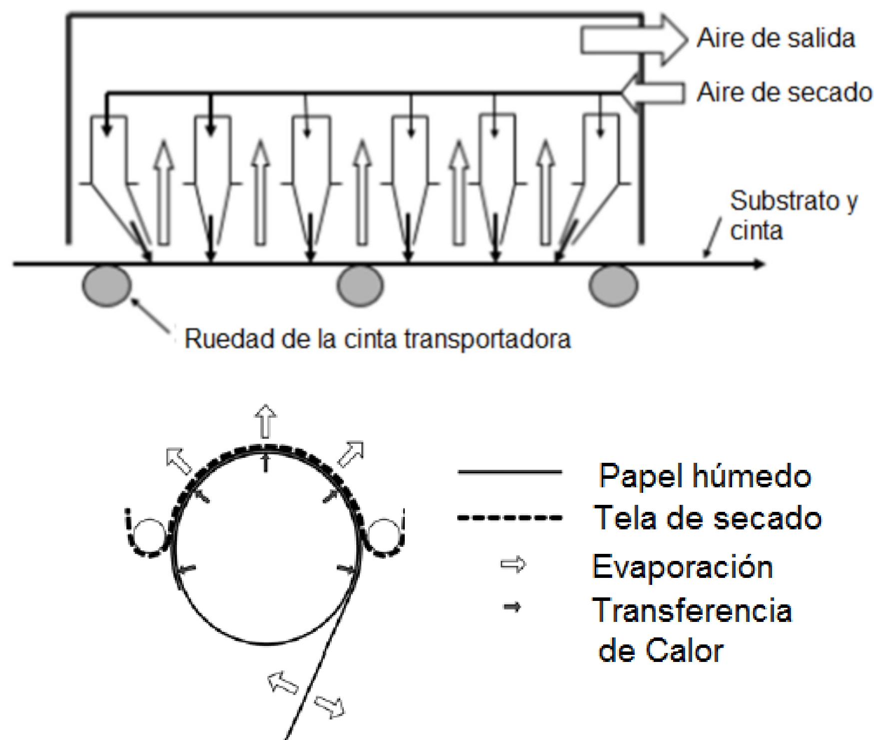


Figura 36. *Arriba*, matriz de boquillas de secador por "impacto de corriente de aire caliente" (chemiprocess.com), *abajo*, Cilindro simple de secado de papel (Lindell y Stenström, 2006).

En el mismo contexto de ambientes de simulación para plantas de producción de papel, Lindell y Stenström (2006), presentaron un estudio de caso que incluyó dos secciones diferentes de secador de papel, un secador multicilindro y un secador combinado de multicilindro y de "impacto de corriente de aire caliente", en el programa Extend v.6 (Imagine That, Inc).

En el análisis para la selección inicial del ambiente de simulación, se evaluaron varios objetivos claves, siendo los dos más importantes, el de trabajar a un nivel de programación basado en módulos y no en la escritura de comandos, y contar con la posibilidad de compartir fácilmente bloques de construcción predefinidos, con una biblioteca disponible. Las herramientas con tales propiedades proporcionarían un ahorro de tiempo significativo en el trabajo de desarrollo del modelo de proceso. Programas como Aspen, Hysys y Chemcad, cumplían ambas demandas. Sin embargo, a la fecha, dichos simuladores, no contaban con modelos para el proceso de secado de papel, siendo además, bastante costosos para comprar y mantener (Lindell y Stenström, 2006).

El ambiente de simulación Extend, tiene la ventaja de ser utilizado para el modelado de procesos en la industria sueca de pulpa y papel. Existen bibliotecas de modelos comerciales con bloques de modelos para operaciones de unidades comunes requeridas en fábricas de pulpa y papel disponibles como complementos para este software, y adicionalmente, la compañía sueca productora de pulpa Södra Cell, usa Extend para crear modelos completos de sistemas de proceso, para sus tres fábricas de pulpa, utilizando modelos tipo bloques, desarrollados internamente, por lo cual se seleccionó este programa (Lindell y Stenström, 2006).

Los módulos desarrollados en la biblioteca Extend v.6, incluyen modelos de bloques para los tipos más comunes de secadoras de papel y equipos de recuperación de calor de la sección de secadores. Los sistemas de proceso se modelaron, utilizando modelos físicos de parámetros agrupados de estado estacionario, con elementos tipo caja negra.

El objetivo del estudio de Lindell y Stenström (2006), fue desarrollar una herramienta de simulación para facilitar el análisis de cómo la sección del secador de papel afecta el balance energético total de la planta durante la producción, en estado estable.

Se creó un modelo de secador de papel como un diagrama de flujo del proceso a partir de estos bloques predefinidos mediante programación gráfica. Los resultados mostraron, cuán útil es la herramienta para el análisis de energía en sistemas de procesos complejos. La herramienta calculó tanto el rendimiento termodinámico como los costos resultantes de energía para una determinada configuración de proceso, y por lo tanto, se concluyó, que podría ayudar a las fábricas a mejorar el rendimiento energético y a tomar decisiones energéticas en tiempo real (Lindell y Stenström, 2006).

El proceso térmico que ocurre en el secado de los recubrimientos de la carrocería de un vehículo, influyen en la precisión dimensional, el diseño de la carrocería y el comportamiento funcional, así como en los aspectos de seguridad relacionados con el rendimiento del choque, los cuales, están descritos, en regulaciones legislativas europeas (Albiez *et al*., 2011).

Como dato curioso, y a pesar de lo hermético del mundo de la fabricación de automóviles, Albiez *et al*. (2011), presentaron una metodología para predecir fallas en la carrocería, debido al tratamiento térmico que se produce, durante el secado de los distintos recubrimientos, en el horno de “corriente de aire caliente”, de una línea de ensamblaje de vehículos Audi. Dentro de esta metodología, la simulación del secado, mediante la técnica de CFD, es una etapa fundamental, previa a la simulación de las tensiones. En la Figura 37, se muestra, la evolución de la

temperatura externa de la carrocería, en función del tiempo transcurrido, dentro del secador.

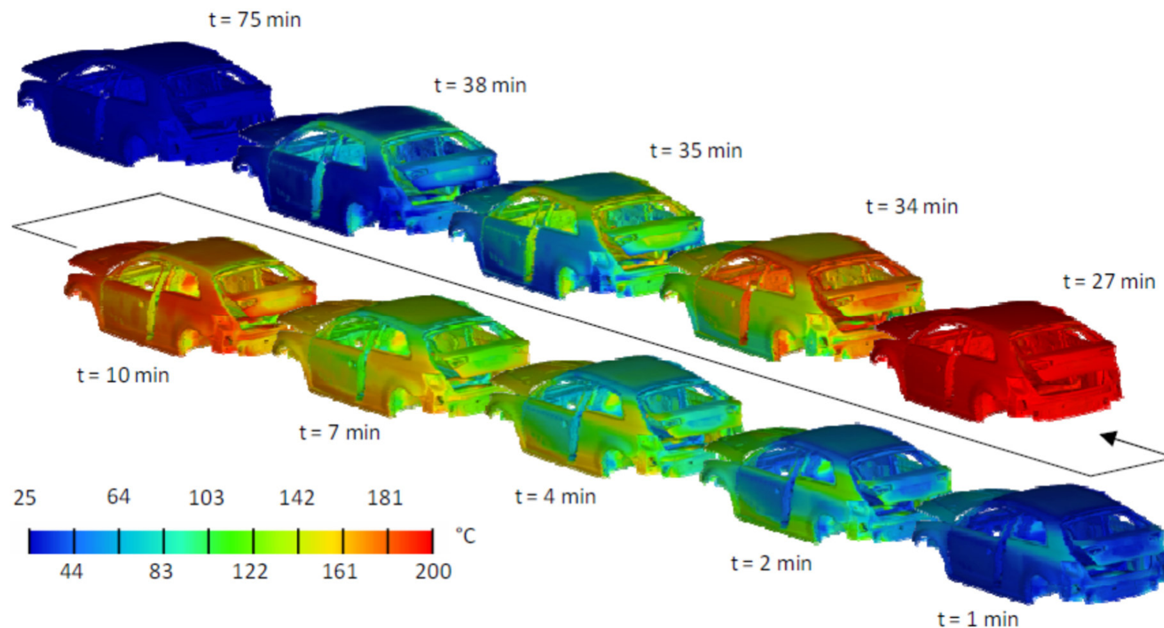


Figura 37. Perfil de temperaturas calculadas en CFD, durante el secado de un Audi (Albiez *et al*., 2011).

Para algunos procesos de interés, la complejidad de los modelos de secadores, han obligado a simularlos, fuera del ambiente de simulación, para luego exportar los resultados. Este es el caso de Harchegani *et al*. (2012), quienes investigaron el consumo de energía y la calidad del proceso de secado del arroz en bruto, utilizando un secador de bomba de calor,[11] (cuyo esquema típico, se muestra, en la Figura 38), diseñado y fabricado en laboratorio.

---

[11] Se ha demostrado que secar a unas condiciones precisad de humedad y temperatura, generan una calidad superior en ciertos productos y esta es la ventaja de los secadores con bomba de calor, en los cuales, la humedad y temperatura del aire de secado, puede ser controlada con bastante precisión. Su principal ventaja es el aprovechamiento del calor del aire de salida y la utilización de fluido eléctrico como fuente de energía para calentar el aire de secado. Su uso inicial ha sido el secado por lotes (bandejas) y secadores de madera, sin embargo, también puede ser usado para secaderos de lechos fluidizados y rotatorios. No se recomienda para secadores con altas demandas de aire como el de transporte pneumático y el de aspersión (Mujumdar, 2006).
En este tipo de secador, tal como se aprecia en la Figura 38, el aire de secado de entrada, pasa a través de la cámara de secado y recoge la humedad del producto. Dicho aire cargado de humedad, se dirige luego a los elementos de intercambio, del evaporador. Durante el proceso de deshumidificación, en el evaporador, el aire se enfría primero hasta su punto de rocío. El enfriamiento adicional da como resultado la condensación de agua del aire. El calor latente de vaporización es absorbido por el evaporador para hervir el gas refrigerante. El calor recuperado se "bombea" al condensador. El aire enfriado y deshumidificado luego absorbe el calor en el condensador, para lograr el calentamiento hasta la temperatura deseada. El ciclo de la

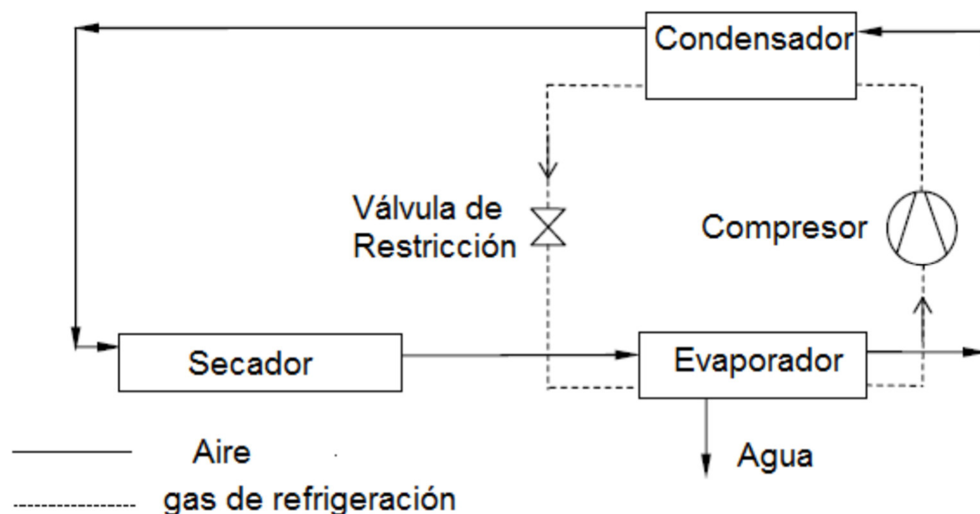


Figura 38. Esquema de un secador con bomba de calor (Mujumdar, 2006).

Para el diseño, se simuló el secador en base a un modelo de no equilibrio desarrollado previamente para la simulación numérica del secado de arroz en bruto, en la modalidad de lecho profundo, resolviendo las ecuaciones diferenciales parciales de dicho proceso de secado, en el software MATLAB. Después de resolver las ecuaciones de secado que rigen el proceso, la información fue exportada al software HYSYS, para simular en ese ambiente, la bomba de calor, utilizando un módulo de compresor, uno de evaporador, uno de válvula de expansión y dos de condensador, siendo el gas de refrigeración R134a, el seleccionado para esta aplicación, y teniendo 1000 kPa, en el lado de alta presión y 100 kPa en el lado de baja presión (Harchegani *et al*. 2012).

Se seleccionó arroz en bruto como material para la evaluación de la configuración. En función de la velocidad mínima de fluidización y la temperatura segura del aire, para secar la variedad de arroz áspero Sazandegi, la velocidad y la temperatura seleccionada para el aire de secado, fueron 1 m/s y 35 °C, respectivamente. La diferencia de fisuración del arroz rugoso antes y después del secado disminuyó aproximadamente un 40 % en el modo de secador con bomba de calor, en comparación con el secador convencional (6 % frente a 10 %). Además, a pesar del consumo de energía del compresor en modo secador de bomba de calor, el consumo total de energía se redujo aproximadamente un 10 % en comparación con

---

bomba de calor, consiste: (1) en una subsección de alta presión y fase gaseosa del gas refrigerante, desde la salida del compresor, hasta la entrada del condensador; (2) una subsección de alta presión y fase líquida, desde la salida del condensador hasta la válvula de restricción; (3) una subsección de baja presión, y de fase líquida, desde la salida de la válvula hasta la entrada del evaporador; y (4) una subsección de baja presión y fase vapor, desde la salida del evaporador, hasta la entrada del compresor (Mujumdar, 2006).

el secador de aire caliente solo. Por lo tanto, se concluye que el sistema de secado de bomba de calor de circuito completamente cerrado, podría aplicarse para el secado de arroz en bruto (Harchegani *et al*. 2012).

Los autores no reportaron el módulo usado para representar el secador dentro de HYSYS, ni tampoco si el MATLAB, estaba unido al HYSYS, online u offline, así como tampoco, la información que suministraron al HYSYS para asumir que tenía un secador en el esquema de proceso. Se desconoce si este procedimiento sea tan eficiente para representar procesos a escala comercial.

Ya entrando enteramente en el ambiente ASPEN, nos saldremos de nuevo, de los estrictos límites establecidos para este estado del arte, esta vez, con el fin de apreciar el problema que se suscita en el área de desarrollo de nuevos procesos, al no contar con módulos de simulación para secadores. En el área de procesos de producción de biocombustibles, es habitual encontrar trabajos, que no toman en cuenta, los procesos de secado. Manteniendo el orden cronológico, del hilo histórico que se está tejiendo, mencionaremos la investigación de Silva *et al*. (2017), sobre la simulación de una planta de producción de furfural, a partir del uso de bagazo de caña como materia prima[12].

---

[12] En un reactor Rosenlew típico, de 12 m de altura con un diámetro de 2,5 m, se inyecta bagazo en la parte superior, el residuo (material lignocelulósico procesado) se elimina en el fondo de forma intermitente, creando así un desplazamiento lento del sólido dentro del reactor, y con un tiempo de residencia de aproximadamente 120 minutos. Se inyecta vapor a 10 bar y 265 °C en flujo a contracorriente en el fondo, proporcionando calor a las reacciones y eliminando los productos formados. El reactor funciona a 10 bar, una condición más severa que otros pretratamientos, ya que no hay adición de ácido. La catálisis es promovida por los ácidos carboxílicos producidos durante la descomposición de la biomasa, principalmente el ácido acético y el ácido fórmico. Los ácidos formados principalmente en la porción media del reactor son eliminados por el vapor. Sin embargo, a medida que el bagazo más frío ingresa al reactor, parte de este vapor ácido se condensa en su superficie y promueve la hidrólisis para producir furfural y más ácidos carboxílicos. A medida que la fase sólida fluye hacia abajo, el vapor promueve la eliminación de la delgada capa líquida sobre las partículas sólidas, promoviendo así la eliminación del furfural. La resistencia de la película se ve superada por las altas velocidades de alimentación de vapor, sin embargo, las condiciones de funcionamiento deben definirse cuidadosamente: cuanto mayor sea la velocidad de alimentación de vapor, menor será la retención de ácidos carboxílicos. Con un tiempo de residencia menor para el ácido carboxílico dentro del reactor, la cantidad total de catalizador dentro del lecho disminuye y la tasa de producción de furfural cae bruscamente. Se debe tener en cuenta que solo el bagazo se utiliza como materia prima para la producción de furfural, mientras que la paja recuperada se quema en la unidad de cogeneración junto con los residuos sólidos producidos en el reactor de Rosenlew (Silva *et al*., 2017).
La purificación de furfural no es sencilla porque el furfural y el agua forman un azeótropo (35% en peso de furfural), y por lo tanto, se debe emplear una serie de columnas, como se muestra en la Figura 39. El proceso de Rosenlew produce una corriente diluida de furfural y otros compuestos orgánicos en el agua, que, después de la condensación, sigue a la primera columna de destilación, representada como C-101. Esta columna elimina el furfural de la solución, ya que la mezcla que ingresa a esta columna contiene menos del 5% en peso de furfural. Para llevar más furfural a la parte superior, se alimenta vapor en la parte inferior de la columna, que incluye un calderín como fuente de calor adicional. El furfural se retira de la columna como una corriente lateral de vapor cerca de la concentración azeotrópica (30,8% en peso de furfural). La parte

En la Figura 39, se aprecia que el bagazo es enviado directo al pretratamiento. Si el bagazo se produce solo en una temporada del año, no sería factible, tener una planta solo para la temporada de caña, sino para todo el año, secando el bagazo y dosificándolo, pudiendo tener equipos más pequeños y un factor de uso de más del 90%.

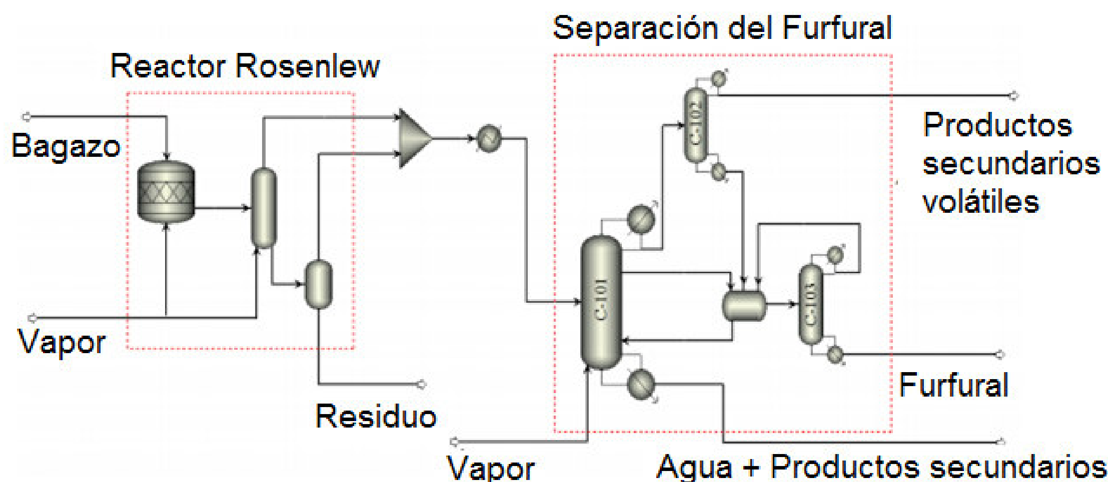


Figura 39. Esquema en ASPEN Plus de una biorrefinería de producción de furfural a partir de bagazo de caña (Adaptado de Silva *et al*., 2017).

La biorrefinería de Silva *et al*. (2017), fue simulada, con una capacidad instalada de, 4 millones de toneladas de bagazo de caña al año, con 200 días de uso al año, lo que representa 6 meses y 20 días, un poco por encima del límite superior del rango de las zafras a nivel mundial. Esto implica un factor de uso de 54,8%, y una capacidad requerida de 20 000 t/día, contra una biorrefinería con factor de uso de 90%, y una capacidad instalada de 12120 t/día, al usar un secador, y almacenar y procesar por 330 días del año, lo que representaría una reducción del 40% de la capacidad requerida en equipos, aproximadamente.

Tal como lo afirma Humbert (1963), la mayoría de las áreas cañeras del mundo están ubicadas en regiones con estaciones definidas de lluvia y sequía, y la

---

superior de la columna es una corriente que contiene los productos secundarios más volátiles, que luego se alimenta a una segunda columna de destilación (C-102) que elimina estos productos secundarios en la parte superior y recupera el furfural en la parte inferior junto con agua en proporción azeotrópica. El fondo de la columna C-102 y la corriente lateral de la columna C-101 se enfrían a 61 ° C y se alimentan a un decantador, donde la fase acuosa vuelve a la primera columna y la fase orgánica, alimenta a una tercera columna (C - 103). Esta última columna, produce furfural a 98.5% en peso de pureza en el fondo y tiene un condensador de dos fases que devuelve la fase orgánica de regreso a la columna, mientras la fase acuosa se envía al decantador (Silva *et al*., 2017).

capacidad de las centrales azucareras o ingenios, se ajusta a la duración de 5 o 6 meses de la estación seca. Esta época de recolección de la caña se le conoce como Zafra[13]. En regiones como Hawái, la molienda se puede extender un poco más de tiempo. Si bien es atractivo moler caña todo el año, y con esto, bajar la capacidad de la planta y distribuir los costos de producción durante todo el año, también es cierto que, la mayor utilidad para el cañero y el azucarero, ocurre en los meses de calidad óptima de la caña.

Entrando ahora al tema de las simulaciones de procesos, reportadas en la literatura, que si incluyen secadores, encontramos casos en el que el secador, se simula con otros módulos preexistentes, o la unión de módulos, como resultado de una excesiva simplificación del modelo real que se debe usar para los secadores, por parte de los investigadores.

Chaisanguan *et al*. (2013), simularon en ASPEN, un proceso de producción de energía eléctrica, a partir de la gasificación y pirólisis de residuos orgánicos municipales, en donde si incluyen la simulación del secador. Como podemos ver en la Figura 40, el secador está configurado como un reactor estequiométrico, un intercambiador y un separador. Esta configuración, unida al hecho de que la corriente de aire, no se incluye, permite evidenciar que no es una simulación rigurosa ni de dimensionamiento para el secador requerido por esta planta.

Barkan *et al*. (2018)[14], reportaron la simulación de un proceso de producción de biomasa deshidratada de algas, a partir del secuestro o captura de emisiones de CO_2 y su posterior bioconversión, en donde el proceso final era un secador rotatorio indirecto de tuberías de vapor (ver esquema en la Figura 41). La producción de algas se orienta hacia nutraceuticos y biodiesel, principalmente, y la captura del CO_2, hacia el área de la conservación del medio ambiente. Los autores simularon el secador, con un módulo de intercambiador de calor de carcasa única en tubo sin bafles.

---

[13] Esta palabra proviene del árabe hispánico sáfra, y este del árabe clásico safrah, viaje, por el que hacían los temporeros en época de recolección.
[14] Reporte de la Universidad de Pensilvania.

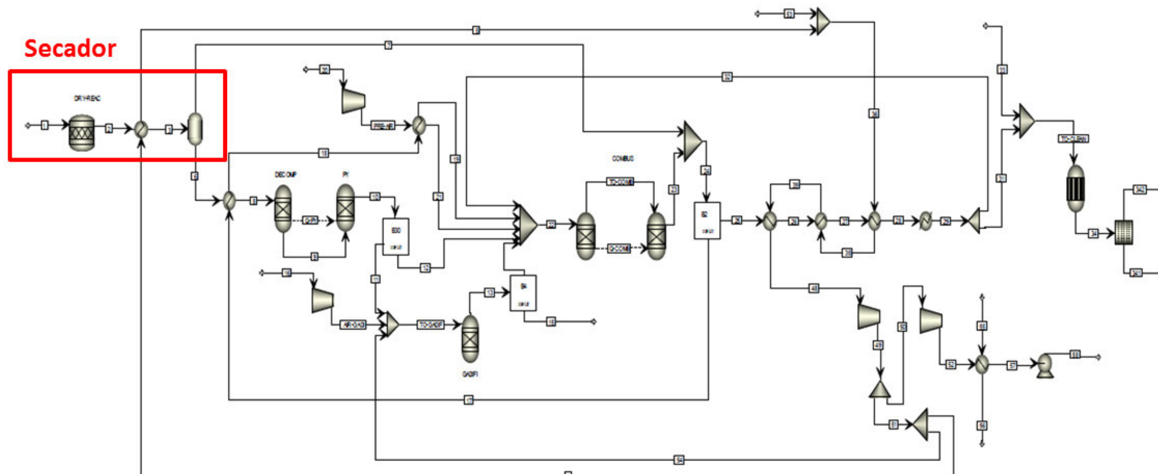


Figura 40. Diagrama en ASPEN, en una planta de gasificación/pirólisis de residuos orgánicos municipales, para producción de enería eléctrica (Chaisanguan *et al*. 2013).

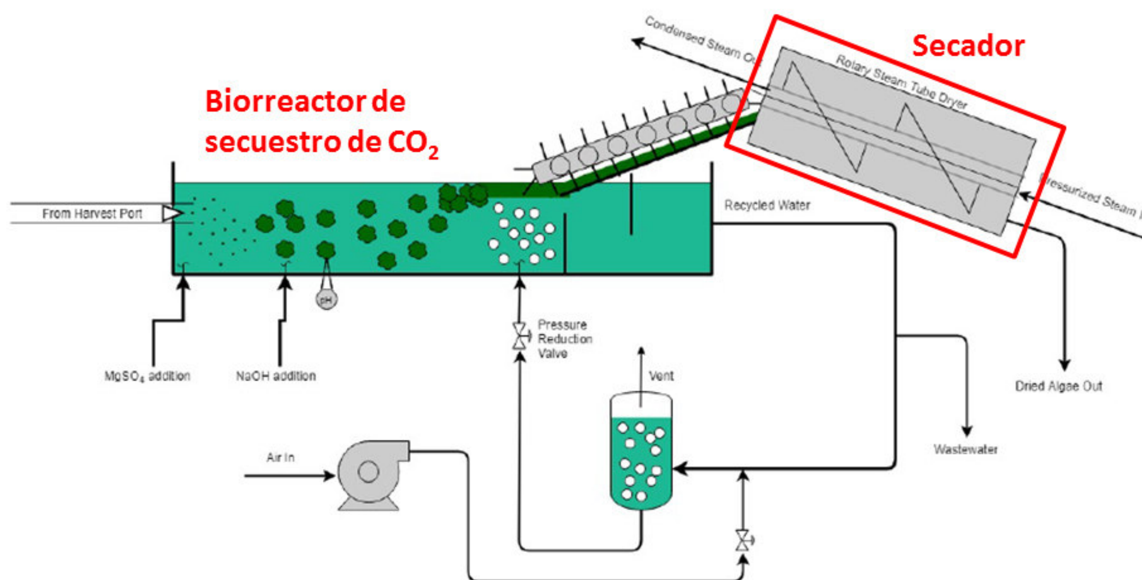


Figura 41. Diagrama del proceso de producción de biomasa deshidratada de Chlorella vulgaris a partir de un proceso de captura y bioconversión de CO_2 (Barkan *et al*., 2018).

Barkan *et al*. (2018), aseguran que dicha configuración, es una aproximación cercana a la realidad, ya que el intercambio de calor entre los dos fluidos ocurre principalmente en la superficie externa del tubo que transporta el vapor, y el tambor rotativo solo rotará a la velocidad necesaria para mover la biomasa (aproximadamente 7,5 rpm). La biomasa es tratada como una pasta. Igualmente,

no se reporta validación de estas asumpciones, para este secador. No reportan el diagrama de flujo en ambiente ASPEN.

En la tesis de maestría de Solé (2018), en la KTH - Department of Energy Technology, de Estocolmo, Suecia, se buscó analizar la tecnología Biomass fired TopCycle (BTC) para producción de energía eléctrica y biocarbón, en una planta, alimentada con 24,4 t/h de biomasa al 50% de humedad, para generar 30 MW de electricidad, 410 kg/h de biocarbón y 18 MW de energía calorífica, en forma de vapor, conectada a la red municipal de calefacción. Con esta validación la empresa buscaría escalar la tecnología para su comercialización.

La tecnología BTC, de la startup (empresa emergente) sueca Phoenix BioPower, consiste en someter a pirólisis[15] la biomasa seca, para luego gasificar[16] el residuo sólido de la pirólisis. Estos dos procesos integrados producen un biocarbón residual y dos corrientes de gas combustible, que se unen para alimentar unas turbinas a gas de ciclo superior, para producción de electricidad. Los gases de combustión, de salida de la turbina, alimentan una caldera que genera vapor para los procesos de pirólisis y gasificación, y para venta a la comunidad (Solé, 2018).

El secador de cinta transportadora, requerido por el proceso, se simuló con una combinación de módulos, tal como se aprecia, en la Figura 42. Como el secador de cinta se usa para el tratamiento térmico de la biomasa, en el modelo de simulación establecido, solo se consideraron, los principios de un intercambiador de calor. Los módulos representan una secuencia de cálculos en donde, en primer lugar, se calculó el calor requerido para vaporizar la humedad del 50% en peso al 15% en peso, a la presión de funcionamiento. Aplicando la eficiencia del intercambiador de calor, se calculó la masa de aire necesaria para secar la partícula de biomasa al valor requerido, así como la potencia necesaria para comprimir el flujo de aire correspondiente (Solé, 2018).

La explicación de los autores, evidencia que no es una simulación rigurosa, ni de dimensionamiento de equipos. Por ningún lado hablan de la cinética de secado, de la altura de capa del secador, si es simple, doble o triple, la recirculación de aire, y

---

[15] La pirólisis es la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. Esta descomposición se orienta a la producción de bioaceite, el cual es un líquido marrón, con una capacidad calorífica, cercana a la mitad de la del fueloil convencional. En este proceso, se forman también, carbón y una fracción gaseosa (Sanz *et al.*, 2017).

[16] La gasificación, es la conversión de la biomasa en una mezcla de gases combustibles a elevada temperatura, a través de una combustión parcial, con una cantidad controlada de oxígeno y vapor de agua. El gas resultante es llamado gas de síntesis, y puede ser usado como combustible o para producir otros químicos como metanol, hidrógeno, o combustible sintético (Sanz et al., 2017).

dimensiones, que son de las variables mínimas para el diseño de un secador de cinta transportadora.

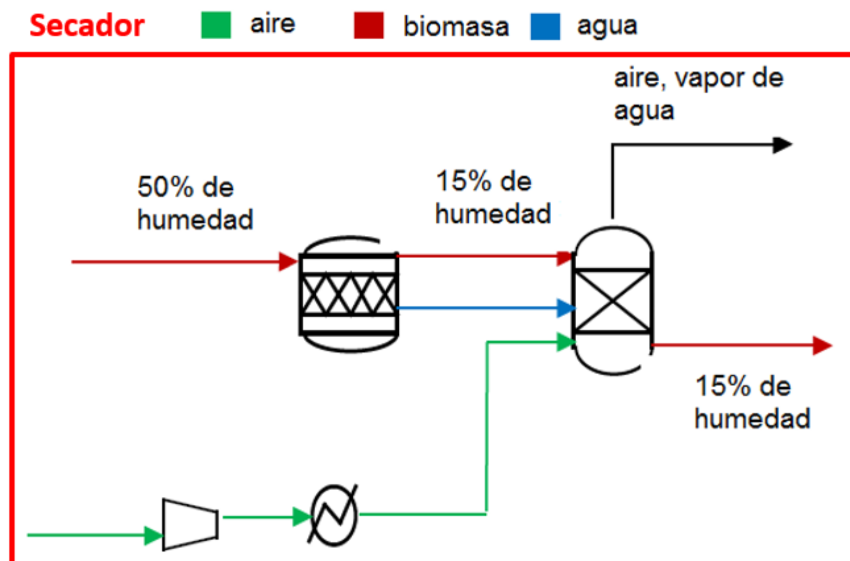


Figura 42. Diagrama de los módulos usados para simular un secador de cinta transportadora en ASPEN por parte de Solé (2018), en el proceso de Phoenix BioPower.

El primer trabajo publicado de simulación de secadores industriales, en ambiente de simulación de procesos comercial, es apenas, de hace 3 años. Yogendrasasidhar *et al*. (2017), evaluaron el secado de arena (SiO_2) en un módulo de simulación de ASPEN V8.4, para secador de lecho fluidizado (ver Figura 43), así como en un secador experimental. Evaluaron el efecto (i) del aumento de la temperatura de entrada de aire, para estudiar las características de la temperatura y la humedad del sólido en la salida (ii) el aumento del diámetro del orificio y (iii) el aumento del número de orificios para estudiar los perfiles de temperatura de salida del sólido.

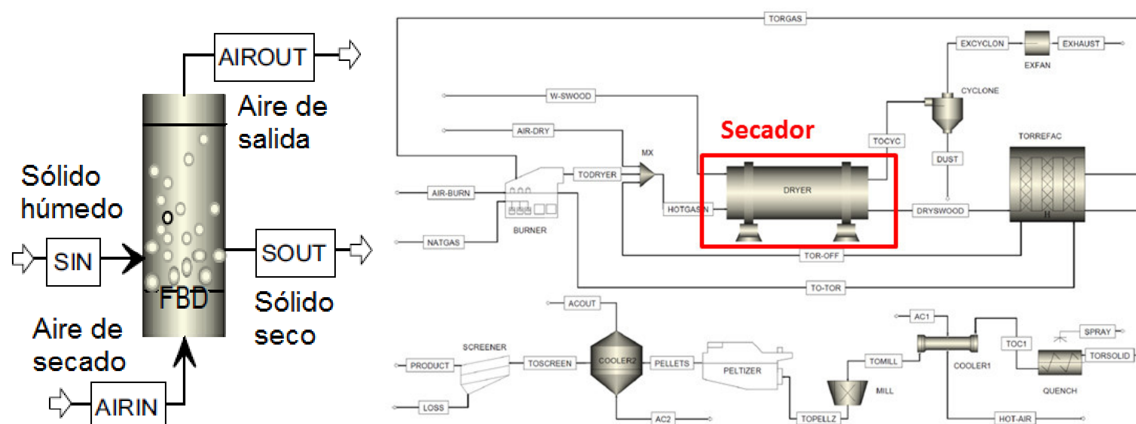
Usaron la solución de Crank a la segunda Ley de Fick, como ecuación cinética, utilizando una sola difusividad efectiva, para todo el rango de temperaturas de secado, presentes dentro del secador, lo que evidencia una excesiva simplificación del fenómeno de transferencia de agua, a través del sólido. La simulación se validó solamente en términos del coeficiente de transferencia de calor calculado, a las condiciones óptimas de secado, sin embargo, los autores no mencionan el término validación como tal. Las diferencias en las dimensiones del secador simulado y el experimental, crean la suposición de que la simulación y el estudio experimental se llevaron a cabo de forma independiente, evaluando por separado las condiciones óptimas de secado.

De este estudio, se encontraron los valores óptimos para el secado en términos de número de orificios y diámetro de los orificios.

Para julio de 2020, solo se ha reportado un trabajo, en el año 2019, de simulación de un proceso, que incluye un secador, con un módulo propio para dicho equipo, en un ambiente de simulación comercial, el cual corresponde a Manouchehrinejad y Mani (2019), para una planta de torrefacción/peletización[17] de madera de pino, simulada en ASPEN V9 (ver el diagrama de flujo ASPEN, en la Figura 43).

Para los cálculos de la simulación se tomó en cuenta la cinética de secado del material y la archiconocida ecuación de Friedman and Marshall para el tiempo de residencia. La simulación se validó contra resultados previos experimentales. Los autores declaran que, el parámetro de rotación del tambor y las áreas de superficie de los elevadores, no están considerados en el secador por convección de sólido en ASPEN, lo que limita en cierta medida la representación de un secador rotativo industrial.

Esto nos permite concluir que, a la fecha, aún queda una brecha importante, entre la simulación rigurosa de secadores industriales, en ambientes de simulación de procesos, y las facilidades actuales de simulación, aún en el programa más avanzado.



---

[17] La torrefacción, es una tecnología de tratamiento de biomasa para mejorar sus propiedades y permitir un procesamiento más fácil. Consiste en un tratamiento térmico leve a temperaturas moderadas, alrededor de 200 °C y 300 °C en un entorno de oxígeno muy bajo o sin oxígeno. El contenido de humedad se reduce, lo que mejora el poder calorífico y la capacidad de molienda, y facilita su almacenamiento, ya que la biomasa torrefactada es hidrófoba. Los procesos de torrefacción pueden ser usados como pretratamientos para otros procesos termoquímicos (Sanz *et al*., 2017). La peletización, es el proceso de comprimir y moldear un material, para que adquiera forma de pellet. los pellets se someten a un procesamiento térmico, que implica etapas de secado, precalentamiento, cocción, post-cocción y enfriamiento.

Figura 43. *Izquierda*, Módulo de AspenV8.4, del secador de lecho fluidizado (Yogendrasasidhar *et al*., 2017). *Derecha*, Diagrama en ASPEN V9 de una planta de torrefacción/pelletización de madera (Manouchehrinejad y Mani, 2019).

Descripción del Programa

SECAVENCA Educación, administra los productos educativos del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, dirigidos a las áreas de alimentos, agroindustria, agrícola (procesamiento post-cosecha), biomasa, papel, madera, petroquímica, minería, materiales de construcción, ambiente (lodos de plantas de tratamientos de aguas y pasivos ambientales), cosméticos, excipientes y principios activos en polvo de medicamentos, entre otros. Dichos productos, son los siguientes:

Cursos

Comprenden 7 cursos, divididos en módulos y 3 temas (secadores de transporte pneumático, de cinta transportadora y rotatorios). Un curso Introductorio común para los tres temas, un curso intermedio (Fundamentos y Principios de Funcionamiento) y uno avanzado (Simulación Rigurosa y Diseño) para cada tema. Pueden verse bajo 4 modalidad: por suscripción, on demand, on line y presenciales.

Modalidades de los cursos

- **Por suscripción:** Vídeo clases grabadas en formatos de vídeos cortos de 12 min, para formación autónoma, visualizados, a través de una plataforma online, con acceso, previo pago de una módica mensualidad. Las opciones son, Curso Introductorio (10 h de clases), Curso de tema completo (42 h de clases) y Programa completo (106 h de clases).
- **On demand:** Cursos evaluados remotos no sincrónicos, con vídeo clases grabadas en formatos de vídeos cortos de 12 min, para su visualización, al ritmo del participante, pero dentro de una ventana de tiempo estipulada, y dentro de una plataforma educativa en la cual están disponibles, guías de estudio y la evaluación de cada módulo. Se brinda acompañamiento remoto no sincrónico por parte del Profesor Alexis Faneite, para dudas y aclaratorias. En esta modalidad se reconocen las horas de estudio, formulación de dudas y análisis de respuestas, investigación, práctica de ejercicios, evaluación y feedback, que el participante invierte de forma autónoma en su formación, a razón del doble de las horas de clase.
- **On line:** Cursos con clases remotas y sincrónicas, con evaluación no sincrónica de cada módulo, dentro de una plataforma educativa online. Se abren dos cohortes al año para clases on line. Se brinda acompañamiento

remoto no sincrónico por parte del Profesor Alexis Faneite, para dudas y aclaratorias y guías de estudio. En esta modalidad se reconocen las horas de estudio, formulación de dudas y análisis de respuestas, investigación, práctica de ejercicios, evaluación y feedback, que el participante invierte de forma autónoma en su formación, a razón del doble de las horas de clase. El horario de las clases es a convenir y es exclusivo para grupos de más de 10 personas. Dentro de la clase se abre un espacio para dudas y aclaratorias en vivo.

- **Presencial:** Curso evaluado de clases presenciales, solo para empresas o instituciones, con un número máximo de 20 participantes. Para temas completos de 42 h (Curso Introductorio + Curso Intermedio + el Curso Avanzado correspondiente), las cuales, se deben dictar en una semana, con fecha a convenir. Se brindan guías de estudio, y respuestas a dudas y resolución de problemas reales de la empresa o institución, durante la clase. Además del certificado respectivo, se expide una constancia de acreditación en las competencias evaluadas.

Descripción de los cursos

- El **Curso Introductorio a la Simulación Rigurosa y al Diseño de Sistemas de Secado Industrial**, es de 10 h de clases, y es requisito para acceder a los Cursos Intermedios. Las competencias a desarrollar en este curso son: Búsqueda de la excelencia; Capacidad crítica; Visión prospectiva; Sensibilidad medioambiental; Sensibilidad interpersonal; Comunicación eficiente y efectiva en el área de secado; Selecciona técnicamente, el tipo de sistema de secado industrial; identifica los fenómenos más importantes que le ocurren a los materiales durante el secado; modela comportamientos cinéticos de secado para el uso de dichos modelos en simulación.
- El **Curso de Bases de Diseño y Fundamentos del Secado en Secadores de Transporte Pneumático**, es de 12 horas de clase, de nivel intermedio, y es requisito para el curso avanzado del mismo tema. El objetivo de este curso es crear la competencia en el participante de establecer las bases teóricas para el diseño riguroso de secadores de transporte pneumático a escala industrial, el análisis y resolución de problemas operacionales y el manejo de herramientas de diseño preliminar.
- El **Curso de Bases de Diseño y Fundamentos del Secado en Secadores de Cinta Transportadora**, es de 12 horas de clase, de nivel intermedio, y es requisito para el curso avanzado del mismo tema. El objetivo de este curso es crear la competencia en el participante de establecer las bases teóricas para el diseño riguroso de secadores de cinta transportadora a escala

industrial, el análisis y resolución de problemas operacionales y el manejo de herramientas de diseño preliminar.

- El **Curso de Bases de Diseño y Fundamentos del Secado en Secadores Rotatorios**, es de 12 horas de clase, de nivel intermedio, y es requisito para el curso avanzado del mismo tema. El objetivo de este curso es crear la competencia en el participante de establecer las bases teóricas para el diseño riguroso de secadores rotatorios a escala industrial, el análisis y resolución de problemas operacionales y el manejo de herramientas de diseño preliminar.
- El **Curso de Simulación Rigurosa y Diseño de Secadores de Transporte Pneumático**, es un curso avanzado, de 20 h de clases. Su objetivo es crear la competencia en el participante de establecer un algoritmo para simular de forma rigurosa, secadores de transporte pneumático, y diseñar aplicaciones industriales de este tipo de secador, para el secado de materiales específicos, una vez traducido dicho algoritmo, en una herramienta poderosa de cálculo.
- El **Curso de Simulación Rigurosa y Diseño de Secadores de Cinta Transportadora**, es un curso avanzado, de 20 h de clases. Su objetivo es crear la competencia en el participante de establecer un algoritmo para simular de forma rigurosa, secadores de cinta transportadora, y diseñar aplicaciones industriales de este tipo de secador, para el secado de materiales específicos, una vez traducido dicho algoritmo, en una herramienta poderosa de cálculo.
- El **Curso de Simulación Rigurosa y Diseño de Secadores Rotatorios**, es un curso avanzado, de 20 h de clases. Su objetivo es crear la competencia en el participante de establecer un algoritmo para simular de forma rigurosa, secadores rotatorios, y diseñar aplicaciones industriales de este tipo de secador, para el secado de materiales específicos, una vez traducido dicho algoritmo, en una herramienta poderosa de cálculo.

Requisitos de ingreso

Solo pueden ingresar Universitarios de los últimos semestres o Profesionales de las Ingenierías Química, en Alimentos, Agroindustrial, Agronómica, Ambiental, Forestal, Petroquímica, en Minas, en Controles (Electrónica, Eléctrica), y Mecánica.

Egreso

Los diplomas están avalados por **SECAVENCA**, por la empresa aliada **Worldwide Consulting & Training SpA**, y por la **International Standards for Education**, con sello de calidad educativa ISFEDU CW5000:2019 (equivalente a la ISO-9001), con

registro en un registro público para la validación de cualquier institución o empleador interesado.

Diplomado de Diseño y Simulación de Secadores Industriales

Comprende todos los módulos de los 7 cursos del Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales, para un total de 106 horas de clase, vistos en cualquiera de sus modalidades, a excepción de la modalidad por suscripción. Aplican los mismos requisitos de ingreso que para los cursos.

Colección de Libros Diseño y Simulación de Secadores Industriales

Esta colección de libros de ingeniería, comprenden 10 libros, para la enseñanza de pregrado y postgrado, con ejemplos de casos prácticos resueltos y propuestos y con algoritmos para la programación de simuladores. Los títulos de los libros, son los siguientes:

- Introducción a la Simulación Rigurosa y Diseño de Secadores Industriales.
- Fundamentos y Principios de Funcionamiento del Secado en Secadores de Transporte Pneumático.
- Fundamentos y Principios de Funcionamiento del Secado en Secadores de Cinta Transportadora.
- Fundamentos y Principios de Funcionamiento del Secado en Secadores Rotatorios.
- Simulación Rigurosa y Diseño de Sistemas de Secado de Transporte Pneumático (Parte I).
- Simulación Rigurosa y Diseño de Sistemas de Secado de Transporte Pneumático (Parte II).
- Simulación Rigurosa y Diseño de Sistemas de Secado de Cinta Transportadora (Parte I).
- Simulación Rigurosa y Diseño de Sistemas de Secado de Cinta Transportadora (Parte II).
- Simulación Rigurosa y Diseño de Sistemas de Secado Rotatorios (Parte I).
- Simulación Rigurosa y Diseño de Sistemas de Secado Rotatorios (Parte II).

Asesorías sincrónicas

Llamada o vídeo llamada, para discutir aspectos técnico-económicos de emprendimientos y de proyectos académicos, empresariales, industriales y/o comerciales, relacionados con los temas del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, con un costo por

hora. No son consideradas necesarias para la consecución de ninguno de los cursos, bajo ninguna de sus modalidades.

Acreditaciones

Evaluación remota con supervisión en vivo y directo, para acreditar las competencias declaradas en los distintos cursos, y que da fe de la capacidad del acreditado de laborar en el área de secado en puestos específicos de la Ingeniería de proyectos, procesos, operaciones e investigación, por lo cual se emite una constancia totalmente gratis. Solo se deben pagar, las horas de atención del Profesor, con el mismo valor de las Asesorías sincrónicas. Para esta evaluación se hace uso de herramientas colaborativas y vídeo llamadas. Esta evaluación es para los egresados de las modalidades on demand y on line, ya que para los cursos presenciales, se acredita automáticamente a cada participante.

No todos los productos antes descritos, están disponibles en este momento, y su disponibilidad, preventa o fecha de lanzamiento, debe ser consultada.

SECAVENCA Filantropía

Es el servicio que invita a Universitarios y Profesionales de la Ingeniería (beneficiarios potenciales), con espíritu emprendedor y con un alto deseo de superación, que desean apoyo para llevar a cabo su capacitación dentro del **Programa Internacional de Cursos de Diseño y Simulación Rigurosa de Secadores Industriales**, a mostrar dicho deseo por medio de un pensamiento, a instituciones benéficas y personas con valores filantrópicos (benefactores potenciales), con capacidad y deseo de apoyar este tipo de actividad educativa, y que refleje el interés compartido (SECAVENCA-Beneficiario-Benefactor) en hacer un aporte al desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe. Consiste en que los beneficiarios potenciales, se registren y escriban un pensamiento que refleje su interés en ser capacitados dentro del Programa en función del aporte que quieren hacer a la sociedad, igualmente deben indicar el porcentaje de subvención que requieren. Dichos pensamientos, serán los que se presenten a los benefactores potenciales, para no dar lugar a la discriminación, sexismo, ni ningún antivalor ajeno a SECAVENCA. Los benefactores que tengan a bien apoyar a alguno de estos candidatos, los seleccionarán en base a sus pensamientos, y a través del contacto con la empresa, se tramitará el apoyo económico correspondiente. La privacidad de beneficiarios y benefactores, será atendida según el deseo de cada una de las partes. **SECAVENCA aporta el 25% de la subvención solicitada**.

Empleo

Los egresados con las máximas calificaciones del Programa, pueden ser contratados como **Evaluadores**, pasando primero por un proceso de acreditación gratuito y subsiguiente vinculación como Evaluador de los cursos que éste tenga aprobado, cuando la demanda del mercado, así lo requiera. Como beneficio adicional, los Evaluadores tienen acceso a los cursos por suscripción completamente gratis e importantes descuentos de preventa permanentes en los productos educativos terminados de SECAVENCA.

En la Figura 44, se muestra el esquema de Cursos y Módulos del Programa. En este momento, están por terminar el módulo de Presentación del programa, que se aprecia en el esquema, indicado con una flecha, habiendo ya superado, los recuadros rellenos, esperando que su "*sed de formación fuera de lo tradicional*", tal como reza, la declaración de intención de SECAVENCA, los impulse a egresar de todo el programa, pudiendo ver en algún momento, todas las casillas rellenas, y teniendo en su haber nuevos conocimientos, habilidades, destrezas, y competencias, que los conviertan en los "*líderes de los cambios en la aplicación de la Ingeniería en América Latina y el Caribe, hacia un continente sostenible, con economía circular e hipocarbónico*".

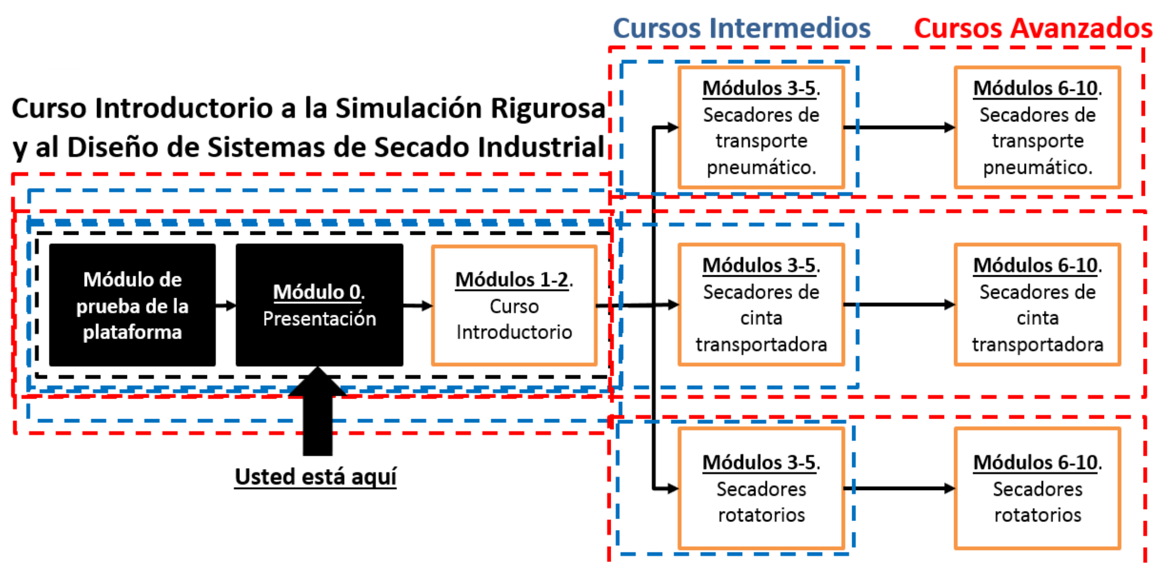


Figura 44. Esquema del Programa de cursos y ubicación de este módulo.

Metas futuras

1. Curso de secadores de lecho fluidizado, por conducción, y solares. Cursos de simulación de secadores por aspersión en CFD.
2. Disponibilidad del Programa de Cursos en inglés.
3. Disponibilidad de simuladores en la nube con fines educativos y de servicios a empresas.

4. Convenio con Universidades para dictar un postgrado en el área.
5. Aplicación gratuita para móviles, mediante alianza con **AppVerso**, con herramientas que hasta el lanzamiento, serán secreto industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aralde, L., Paz, D., y Cárdenas, G. (1992). Metodología de cálculo de un secadero de bagazo en transporte Neumático. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. 69(2), 71-79. Argentina.

Aralde, L, Paz, D., y Cárdenas, G. (1993). Análisis del funcionamiento de un prototipo para secado de bagazo. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. 70(2), 7-14. Argentina.

Barkan, C.M., De Luca, K.A., Preston, MR (2018). Design of A Flexible, High-volume Direct Flue Gas-to-Algae Conversion Process for Value-added Bioproducts. Senior Design Reports (CBE). 102. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, School of Engineering and Applied Science, University of Pennsylvania. Recuperado de https://repository.upenn.edu/cbe_sdr/102

Barrueta, Y., Pacheco, J., Chourio, J., **Faneite, A.**, Hernández, I., Morales, K. (2014). Predicción de tiempos de residencia en secadores rotatorios. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Imelda Rincón Finol" "Investigamos e Innovamos para Venezuela". Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de Septiembre de 2014. 1441 – 1446. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.3138.8482.

Brennan, J. G., Grandison, A. S. (2012). Food processing handbook. Volumen 1. Segunda Edición. Alemania: Wiley-VCH.

Cardozo R., R. M. (2018). Modelado de la cinética de deshidratación osmótica y secado en la estufa del pseudofruto del *Anacardium occidentale* L., para la producción de pasas en el Estado Zulia. Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad del Zulia para optar al Grado Académico de *Magister Scientiarum* en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Maracaibo, Venezuela.

Chaisanguan, C., Patumsawad, S., Narataruksa, P. (2013). Simulation of MSW Pyrolysis/Gasification Processes for Power Production. Advanced Materials Research, 807 - 809, 1270-1276.

Chourio, J., Pacheco, J., Barrueta, Y., **Faneite, A.,** Hernández, I., Marrufo, B. (2014). Determinación experimental de tiempos de residencia en un secador rotatorio. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Imelda Rincón Finol" "Investigamos e Innovamos para Venezuela". Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de Septiembre de 2014. 1462 – 1469. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.1303.8408.

Deshpande, S., Watson, L. T., Shu, J., Kamke, F. A., Ramakrishnan, N. (2011). Data driven surrogate-based optimization in the problem solving environment WBCSim. Engineering with Computers, 27(3), 211-223.

Esmaiili, M., Sotudeh-Gharebagh, R., Mousavi, M. A., Rezazadeh, G. (2007). Influence of dipping on thin-layer drying characteristics of seedless grapes. Biosystems Engineering, 98(4), 411-421.

Faneite, A., Ferrer, A. Aiello-Mazzarri, C., Villegas, J., Gnansounou, E. (2012). Interaction Between Chemical Composition, Microcrystalline Structure and Morphology of the Most Important Agricultural Byproducts in the Northern of South America, and its Drying Kinetic. ISAF XIX. International Symposium on Alcohol Fuels. Verona, 10-14 October 2011. Book of Proceedings. ISBN 978-88-7743-369-5. 439 – 442.

Faneite, A., Ferrer, A., Ledesma, A., Luzardo, M. (2016b). Alimentación de animales de granja en el trópico, desde la perspectiva de la Ingeniería Química. Propuesta de Materias primas Autóctonas, como Alternativa para la producción de Alimento Balanceado para Animales (ABA). FUNDACITE - ZULIA. Maracaibo, 03 de Noviembre de 2016.

Faneite, A., Ferrer, A., López, A., Medrano, J., Hernández, C. (2013a). Modelado de la cinética de secado de residuos pesqueros (cangrejos y camarones), como base para la simulación de secadores agroindustriales. II Congreso Venezolano y III Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Luz Maritza Reyes". 21, 22 y 23 de octubre de 2013. Hotel Venetur, Maracaibo, Venezuela. 911 - 924. Depósito legal: LF18520130013819. DOI: 10.13140/2.1.2843.9362.

Faneite, A., Ferrer, A., Medrano, J., Gutiérrez, M., Arends, K. (2013b). Bases de diseño para secadores agroindustriales de bagazo de caña en biorefinerías con pretratamiento amoniacal. II Congreso Venezolano y III Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Luz Maritza Reyes". 21, 22 y 23 de octubre de 2013. Hotel Venetur, Maracaibo, Venezuela. 896 - 910. Depósito legal: LF18520130013819. DOI: 10.13140/2.1.3867.9365.

Faneite, A., Ferrer, A., Tudare, J., Cardozo, R. (2013c). Biorefinación de la *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo. Parte I. Acondicionamiento de Materia Prima. Boves, M, and Rincón, J. (Editores). Eutrofización del Lago de Maracaibo: Pasado, Presente y Perspectivas. Comisión permanente para el estudio de la cuenca del Lago de Maracaibo y gestión integral del agua. 225- 255. Depósito legal lfi18520135744193. ISBN: 978-980-402-147-3. DOI: 10.13140/2.1.4474.1449.

Faneite, A., Ferrer, A., Villalobos, L., Araujo, S. (2013d). Estudio del proceso de secado de la *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo, como estrategia de acondicionamiento para su aprovechamiento agroecológico. Suplemento de las II Congreso Venezolano y III Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil "Dra. Luz Maritza Reyes", 21, 22 y 23 de octubre de 2013, Hotel Venetur Maracaibo. Maracaibo, Venezuela. 77 - 89. Depósito legal: LF18520130013819. ISBN: 978-980-402-145-9. DOI: 10.13140/2.1.3237.1524.

Faneite, A., Garcés, S., Aular, J., Urdaneta, M., Soto, D. (2012). Excess Molar Volumes, Excess Molar Enthalpies and Refractive Index Deviations for Binary Mixtures of Propan-1-ol, Butan-1-ol and Pentan-1-ol with 2,2,4-Trimethylpentane at 298.15 K. Fluid Phase Equilibria, 334. p. 117 – 127.

Faneite, A., Parra, J., Colón, W., Ferrer, A., Angós, I., Argüello, G. (2020). New thin-layer drying models for the design and simulation of cassava root dryers and phenomenological study of interaction water-starch during diffusion. International Food Research Journal. 27(1): 182 - 196.

Faneite, A., Pirela, J., Cardozo, R., Ferrer, A. (2007a) Establecimiento de un modelo semi-empírico sencillo para el diseño de secadores rotatorios continuos para lemna a escala industrial. 1er Congreso Científico Técnico de Ingeniería - LUZ. DOI: 10.13140/2.1.1008.9289.

Faneite, A., Pirela, J., Cardozo, R., Ferrer, A. (2006). Ingeniería Básica para el diseño de un secador rotatorio continuo para deshidratar la Lemna obscura presente en el Lago de Maracaibo. Ciencia, 14(2): 131 - 146. ISSN: 1315-2076.

Faneite, A., Pirela, J., Cardozo, R., Ferrer, A. (2007b). Optimización de las variables de operación de un secador rotatorio continuo a escala piloto, en el secado de biomasa. 1er Congreso Científico Técnico de Ingeniería - LUZ. DOI: 10.13140/2.1.3081.5046.

Faneite, A., Pirela, J., Cardozo, R., Ferrer, A. (2010). Optimización del secado de Lemna del lago de Maracaibo en secadores rotatorios continuos. Ciencias e Ingeniería al Día, 4(2): 25 - 40. ISSN: 1900-768X. ISSN (online): 2357-5409.

Faneite, A. Rincón, A. Ferrer, A., Angós, I., Arguello, G. (2016a). Mathematical modeling of thin layer drying of green plantain (*Musa paradisiaca* L.) peel. International Food Research Journal. 23(5): 2088-2095.

Faneite N., Alexis M. (2010). Cinética del secado de materiales lignocelulósicos tratados y no tratados con presurización y despresurización (PDA). Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad del Zulia, para optar al Grado Académico de *Magister Scientiarum* en Ingeniería Química. División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Faneite N., Alexis M. (2008). Guía de Laboratorio de Operaciones Unitarias II. Cátedra: Operaciones de Transferencia de Masa. Departamento de Ingeniería Química Básica. Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia: Venezuela.

Faneite N., Alexis M. (2014). La biorefinación como estrategia para frenar el avance de la frontera agrícola en los países del MERCOSUR. Encuentro Zuliano de Educación Universitaria, hacia el Desarrollo Sostenible. Ministerio del Poder Popular para el Ambiente y Ministerio del Poder Popular para la Educación Universitaria. Maracaibo, del 07 al 11 de octubre de 2013. 49 - 63. Depósito Legal: LFX22220133702954. ISBN: 978-980-04-1502-3. DOI: 10.13140/2.1.3343.6486.

Ferrer, A. Alciaturi, C., **Faneite A.,** Ríos, J. (2016). Analyses of Biomass Fibers by XRD, FTIR, and NIR. In Vaz, S. (Ed.). Analytical Techniques and Methods for Biomass. First edition. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-41413-3. DOI 10.1007/978-3-319-41414-0. pp 45 – 83.

Garcés, Siby I., **Faneite, Alexis M.**, Soto, Diana, Álvarez, Cesar A., Urdaneta, Mario R. (2011). Isothermal Vapor–Liquid Equilibrium Data of Propan-1-ol + 2,2,4-Trimethylpentane and Butan-1-ol + 2,2,4-Trimethylpentane at 318.15 K. Journal of Chemical & Engineering Data, 56(8). p. 3346–3350.

Goel, A., Phanouriou, C., Kamke, F. A., Ribbens, C. J., Shaffer, C. A., Watson, L. T. (1999). WBCSim: a prototype problem solving environment for wood-based composites simulations. Engineering with Computers, 15(2), 198-210.

Gong, Z. X., Mujumdar, A. S. (2008). Software for design and analysis of drying systems. Drying Technology, 26(7), 884-894.

Gundlach, E. R., Findikakis, A., *et al*. (2001). Remediation and transportation planning, Lake Maracaibo, Venezuela. Proceedings of the International Oil Spill Conference. Perspectives, Updates, Logistics. Tampa, Florida, March 26-29.

Harchegani, M. T., Sadeghi, M., Emami, M. D., Moheb, A. (2012). Investigating energy consumption and quality of rough rice drying process using a grain heat pump dryer. Australian Journal of Crop Science, 6(4), 592 - 597.

Hernández, I., **Faneite, A.,** Barrueta, Y., Pacheco, J., Chourio, J., Morales, K. (2014). Predicción de la retención en secadores rotatorio en función del tipo de elevador. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil “Dra. Imelda Rincón Finol” “Investigamos e Innovamos para Venezuela”. Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de Septiembre de 2014. 1480 – 1487. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.2876.7043.

Hodson de J., E. (2018). Bioeconomía: el futuro sostenible. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 42(164), 188-201. doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.650

Humbert, R. P., Bonnet, J. A. (1963). The growing of sugar cane. Elsevier. ISBN: 9781483275185. DOI 10.1016/C2013-0-12542-1. pp 720.

Hytönen, E., Puumalainen, T. (2006). Simulation Based Analysis of the Influence of Impingement Drying on the Energy Concept of a Paper Mill Integrate. In Proceedings 15th International Drying Symposium (IDS 2006), Budapest, Hungary (pp. 987-994).

Ibarz, A., Barboza-Cánovas, G. V. (2003). Unit Operations in Food Engineering. Estados Unidos de Norteamérica: CRC Press LLC.

Kamal, M. M., Ali, M. R., Shishir, M. R. I., Mondal, S. C. (2020). Thin-layer drying kinetics of yam slices, physicochemical, and functional attributes of yam flour. Journal of Food Process Engineering, e13448.

Kamke, F. A., Watson, L. T., Lee, J. N., Shu, J. (2006). A problem solving environment for the wood-based composites industry. Department of Computer Science, Virginia Polytechnic Institute & State University.

Kamke, F. A., Wilson, J. B. (1985a). Computer simulation of a rotary dryer. Part I: Retention time. AIChE Journal, 32(2), 263-268.

Kamke, F. A., Wilson, J. B. (1985b). Computer simulation of a rotary dryer. Part II: Heat and mass transfer. AIChE Journal, 32(2), 269-275.

Karathanos, V. T., Vagenas, G. K., Saravacos, G. D. (1991). Water diffusivity in starches at high temperatures and pressures. Biotechnology progress, 7(2), 178-184.

Keskes, S., Hanini, S., Hentabli, M., Laidi, M. (2020). Artificial Intelligence and Mathematical Modelling of the Drying Kinetics of Pharmaceutical Powders. Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske, 69(3-4), 137-152.

Leng, R. A., Preston, T. R., Rodríguez, L. (2004, 21 de julio). El crecimiento explosivo de lemna en el Lago Maracaibo: “Evaluación de las causas y propuestas para el futuro”. Fundación Universidad para la Agricultura Tropical (UTA). Informe presentado a la Fundación CIARA. Caracas, Venezuela.

Lindell, K., Stenström, S. (2006). A modular process modeling tool for the analysis of energy use and cost in the pulp and paper industry. Drying Technology, 24(11), 1335-1345.

Manouchehrinejad, M., Mani, S. (2019). Process simulation of an integrated biomass torrefaction and pelletization (iBTP) plant to produce solid biofuels. Energy Conversion and Management: X, 1, 100008.

McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P. (1991). Operaciones de Transferencia de Masa. Cuarta Edición. España: McGraw–Hill/Interamericana.

Medrano, J., Rondón, K., **Faneite, A.,** Ferrer, A. (2013). Modelado del secado en capa fina de las hojas de yuca. II Congreso Venezolano y III Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil “Dra. Luz Maritza Reyes”. 21, 22 y 23 de octubre de 2013. Hotel Venetur, Maracaibo, Venezuela. 378 - 396. Depósito legal: LF18520130013819. DOI: 10.13140/2.1.2295.0720.

Mestre, M. V. (2018). Bioeconomía: el diseño de un cambio de rumbo. Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente (125), 50-67.

Montiel R., M. (2017). Diseño de una biorefinería para la producción de jarabe glucosado de bagazo de caña integrada a una central azucarera. Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad del Zulia, para optar al Grado Académico de *Magister Scientiarum* en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Morán G., H. A. (2011). Modelado del secado de capa fina de pastos de corte y pastoreo. Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad del Zulia, para optar al Grado Académico de *Magister Scientiarum* en Ciencia y Tecnología de Alimentos. División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Morán G., H. A., **Faneite N., A. M.,** Salones C., G. del V., Gámez G., J. V., Ferrer O., A. de J. (2017). Biorefinación del fruto del *Prosopis juliflora* para producción de etanol. Evaluación de las etapas de acondicionamiento y pretratamiento. AVANCES Investigación en Ingeniería, 14, 169-183.

Mosquera, J., Mercado, D. (2018). Desarrollo de un modelo de simulación para secadores rotatorios de residuos cítricos. Trabajo Especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad del Zulia para optar al Grado Académico de Ingeniero Química. Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Moyers, C. G., Baldwin, G. W. (1997). Sección 12: Psychrometry, Evaporative Cooling, and Solids Drying. En Perry, R. H., Green, D. W., Maloney, J. O., Editores. Manual del Ingeniero Químico de Perry. Séptima Edición en Inglés. Estados Unidos de Norteamérica: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Mujumdar, A. S. (2006). Handbook of Industrial Drying. Tercera edición. Estados Unidos de Norteamérica: Taylor & Francis Group, LLC.

Pacheco, J., Barrueta, Y., Chourio, J., **Faneite, A.,** Hernández, I., López, Y. (2014). Análisis estadístico de resultados de transporte de sólidos dentro de un secador rotatorio. III Congreso Venezolano y IV Jornadas Nacionales de Investigación Estudiantil “Dra. Imelda Rincón Finol” “Investigamos e Innovamos para Venezuela”. Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia. Maracaibo, 24, 25 y 26 de Septiembre de 2014. 1447 – 1453. ISBN: 978-980-402-163-3. Depósito Legal: lfx18520140012754. DOI: 10.13140/2.1.2254.1120.

Puente-Díaz, L., Spolmann, O., Nocetti, D., Zura-Bravo, L., Lemus-Mondaca, R. (2020). Effects of Infrared-Assisted Refractance Window™ Drying on the Drying Kinetics, Microstructure, and Color of Physalis Fruit Purée. Foods, 9(3), 343.

Ramakrishnan, N., Watson, L. T., Kafura, D. G., Ribbens, C. J., Shaffer, C. A. (2002). Programming environments for multidisciplinary Grid communities. Concurrency Computat.: Pract. Exper., 14,1241–1273.

Sanz, A., Susmozas, A., Peters, J., Dufour, J. (2017). Chapter 6. Biorefinery Modeling and Optimization. En Rabaçal, M., Ferreira, A. F., Silva, C. A.M., Costa, M. (Eds.). Biorefinerie - Targeting Energy, High Value Products and Waste Valorisation. Suiza: Springer. pp 124 – 125.

Shi, S., Walker, J. C. (2006). Wood-based composites: plywood and veneer-based products. In Primary Wood Processing (pp. 391-426). Springer, Dordrecht.

Shu, J., Watson, L. T., Ramakrishnan, N., Kamke, F. A., Zombori, B. G. (2004). An experiment management component for the WBCSim problem solving environment. Advances in Engineering Software, 35(2), 115-123.

Shu, J., Watson, L. T., Ramakrishnan, N., Kamke, F. A., North, C. L. (2008). Unification of problem solving environment implementation layers with XML-based specifications. Advances in Engineering Software, 39(3), 189-201.

Shu, J., Watson, L. T., Zombori, B. G., Kamke, F. A. (2002). WBCSim: An Environment for Modeling Wood-Based Composites Manufacturing. Department of Computer Science, Virginia Polytechnic Institute & State University.

Shu, J., Watson, L. T., Zombori, B. G., Kamke, F. A. (2006). WBCSim: an environment for modeling wood-based composites manufacture. Engineering with Computers, 21(4), 259.

Silva, J. F. L., Selicani, M. A., Junqueira, T. L., Klein, B. C., Vaz Júnior, S., Bonomi, A. (2017). Integrated furfural and first generation bioethanol production: process simulation and techno-economic analysis. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 34(3), 623-634.

Singh, J.K.; Chaurasia, B.; Dubey, A.; **Faneite N., A.M.**; Gupta, A.; Kothari, R.; Upadhyaya, C.P.; Kumar, A.; Hashem, A.; Alqarawi, A.A.; et al. Biological Characterization and Instrumental Analytical Comparison of Two Biorefining Pretreatments forWater Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Biomass Hydrolysis. Sustainability 2021, 13, 245. https://doi.org/10.3390/su13010245.

Solé C., À. (2018). Biochar production integration into Phoenix BioPower BTC technology. Master of Science Thesis. InnoEnergy SELECT Master Program. KTH - Department of Energy Technology. Estocolmo, Suecia.

Suárez, L., **Faneite, A.,** Ferrer, A., 2013. Modelado del secado en capa fina y del presecado al sol a diferentes alturas de capa de la *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo. Revista Tecnocientífica URU, 4. p. 73 – 85. ISSN: 2244-775X.

Thompson, T. L., Foster, G. H., Peart, R. M. (1969). Comparison of concurrent-flow, crossflow, and counterflow grain drying methods (No. 841). Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Treybal, R. E. (2001). Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición. México: McGraw–Hill Book Co.

Tudare, J., **Faneite, A.**, Ferrer, A., Chacón, D., Ríos, J., Ledesma, A., 2013. Pretratamiento de la Cascarilla de Arroz, con Ozono, para Producción de Bioetanol. I Congreso Venezolano "Uso Racional y Eficiente de la Energía - Energías Renovables". Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica. Del 30 de octubre al 01 de noviembre de 2013. Maracaibo, Venezuela. DOI: 10.13140/2.1.1852.7040.

Yogendrasasidhar, D., Srinivas, G., Setty, Y. P. (2017). Effect of distributor on performance of a continuous fluidized bed dryer. Heat and Mass Transfer, 54(3), 641-649.